

一种基于序分量解耦的谐波潮流算法

喻荟铭, 陆 达, 谢艳辉

(厦门大学计算机科学系 福建 厦门 361005)

【摘要】 针对配电网三相不对称情况下的谐波潮流问题, 提出了一种基于对称分量坐标下三序解耦的计算方法。结合电网各主要电力元件在不对称情况下的运行特点, 给出了其对称分量解耦的谐波潮流计算模型。在利用计算机编程进行配电网谐波潮流计算时, 三序分别求解的特点可以大量减少内存占用和计算量。

【关键词】 谐波潮流; 三相不对称; 对称分量; 解耦

0、引言

随着我国电力建设的迅速发展, 大量非线性特性的电力设备投入电网运行, 这些非线性设备造成电力系统谐波污染情况日益严重。国外发达国家对电力谐波污染相当重视, 相应的分析和手段也十分先进, 在我国加入 WTO 后, 经贸法逐步和国际接轨, 由于谐波污染的电能质量问题所引起的纠纷日益突显。对电网进行谐波潮流计算分析, 抑制电网谐波带来的影响, 减小电力系统受到的危害, 已成为当前急待解决的问题。

传统三相潮流计算方法中, 系统三相不对称运行引起的参数耦合问题一般通过三相或三序联立方程来解决, 导致所列方程维数大大增加, 在计算节点数较多的大系统时尤其严重。文献[1]在处理谐波潮流问题时, 通过引入补偿注入电流建立了不对称线路和负荷的解耦-补偿模型, 文献[2]考虑发电机实际运行特点, 提出可将发电机节点的三相约束条件简化为正序约束条件。谐波潮流计算一般采用迭代的方式求解, 解耦过程中每次计算均利用上次迭代后的修正解来建立解耦-补偿模型, 在实现解耦的同时仍然能很好地保持结果的准确性。基于这种思想, 本文将解耦-补偿理论引入到不对称谐波潮流计算中, 建立了各电力元件的对称分量解耦计算模型, 实现了一种基于对称分量解耦的配电网谐波潮流计算方法。

1、电力系统元件对称分量解耦模型

1.1 发电机

一般发电机的电势可以认为是纯正弦的, 高次谐波网络中不包含发电机电势^[3]。因此在对称分量坐标中, 发电机各序等值电路可以分别表示为一个与中性点(地)相联的阻抗, 其中基波正序例外。基波正序中, 发电机直接以 PV 节点参加牛顿-拉夫逊法(以下简称 N-R 法)潮流计算, 其正序功率约束条件可由发电机的三相总功率约束条件获得^[4],

$$P_1 = \frac{1}{3} P_2 \quad (1)$$

1.2 变压器

谐波网络中, 一般认为变压器各序分量相互之间无影响, 因此变压器谐波计算模型仍可表示为三序分开独立的等值电路。因连接方式的不同, 变压器可以有不同的序参数模型^[5], 根据这些序分量等效电路, 就可以很容易得到三序的导纳矩阵。

1.3 输电线路

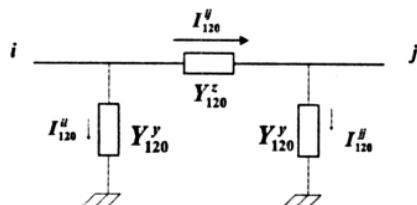


图1 不对称输电线路的等值电路

三相对称输电线路的参数变换到对称分量坐标中后自然的三序解耦, 而不对称输电线路三相参数经过相序变换, 正负零三

序分量呈现耦合, 表现为导纳矩阵 非对角线元素中存在非零项。谐波时, 线路的分布特性将非常显著, 由于针对各次谐波计算需要的 Π 型电路数量不确定, 因此使用多个 Π 型等值电路来代表线路的方式并不适合, 通常是采用双曲线函数来计算输电线路谐波时的等值电路参数。线路的等值电路可表示为:

由图1, 易得如下关系:

$$Y_{120}^z (V_{120}^i - V_{120}^j) = I_{120}^u \quad (2-a)$$

$$Y_{120}^y V_{120}^i = I_{120}^u \quad (2-b)$$

$$Y_{120}^y V_{120}^j = I_{120}^u \quad (2-c)$$

利用不对称输电线路的三序解耦-补偿模型^[6], 将序间耦合关系, 即矩阵中非对角线上的非零项, 以补偿注入电流的形式来表示。以正序为例, 式(2)的正序部分可写为如下形式:

$$y_{11}^i (V_1^i(k+1) - V_1^j(k+1)) = I_1^i(k+1) - \Delta I_1^i(k+1) \quad (3-a)$$

$$\Delta I_1^i(k+1) \approx y_{12}^i (V_2^j(k) - V_2^i(k)) + y_{10}^i (V_0^j(k) - V_0^i(k)) \quad (3-b)$$

$$y_{11}^j V_1^j(k+1) = I_1^j(k+1) - \Delta I_1^j(k+1) \quad (4-a)$$

$$\Delta I_1^j(k+1) \approx y_{12}^j (V_2^i(k) + y_{10}^j V_0^i(k)) \quad (4-b)$$

$$y_{11}^i V_1^i(k+1) = I_1^i(k+1) - \Delta I_1^i(k+1) \quad (5-a)$$

$$\Delta I_1^i(k+1) \approx y_{12}^i V_2^j(k) + y_{10}^i V_0^j(k) \quad (5-b)$$

式中, k 为迭代次数, 这时等值电路可表示为:

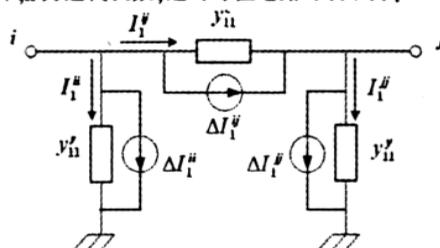


图2 不对称输电线路的正序解耦-补偿等值电路

则由图2易知, 线路两端节点的补偿注入电流为

$$\text{节点 } i \Delta I_1^i(k+1) = -\Delta I_1^i(k+1) - \Delta I_1^j(k+1) \quad (6-a)$$

$$\text{节点 } j \Delta I_1^j(k+1) = -\Delta I_1^j(k+1) + \Delta I_1^i(k+1) \quad (6-b)$$

负序、零序经由同样的方式实现解耦, 通过式(3)-(6)求出该序补偿注入电流。特殊地, 基波正序计算时还需要将补偿注入电流表示为补偿注入功率的形式, 以适用于 N-R 法求解^[6]。

1.4 负荷

负荷的对称分量模型, 基波计算中可表示为注入功率或电流, 谐波计算时则往往处理为各序等效阻抗。在基波潮流计算中, 需要将给出的三个单相负荷功率转化为对称分量坐标中的三序注入电流。由第 k 次迭代后的节点三序电压 $V_{120}(k)$ 变换为相电压 $V_{abc}(k)$, 可求出三序注入电流:

$$I_{abc}(k+1) = -S_{abc}^* / V_{abc}(k) \quad (7)$$

由 $I_{abc}(k+1)$ 再经相序变换即可得到各序注入电流 $I_{120}(k+1)$, 其中正序注入电流还需要转化为注入功率,

$$S_1(k+1) = V_1(k+1)^* I_1(k+1) \quad (8)$$

谐波潮流计算中, 若没有给出负荷谐波阻抗时, 可以近似地以一等值电动机来模拟, 由基波阻抗来求出正序和负序的谐波

阻抗,零序电流一般不会进入负荷,因此零序系统中可忽略负荷支路。正序和负序负荷节点谐波等值阻抗可由下式求得,

$$Z_1^{(n)}, Z_2^{(n)} = \sqrt{n} R_2^{(n)} + jn X_2^{(n)} \quad (9)$$

式中 $R_2^{(n)}, X_2^{(n)}$ 为负荷基波负序阻抗,可由负荷节点的基波负序电压和注入电流求得,

$$Z_2^{(1)} = V_2^{(1)} / I_2^{(1)} = R_2^{(1)} + jX_2^{(1)} \quad (10)$$

1.5 谐波源模型

对于谐波源,通常不考虑它们的内部结构,而是将它们的各种谐波注入电流表示为基波电压和某几次谐波电压的函数。函数表达式应尽可能减少自变量电压项的个数,忽略一些影响较小的谐波电压,尤其是各高次谐波电压。这样可以在基波谐波潮流迭代计算时,减少部分高次谐波的计算。谐波源特性一般可以表示为:

$$I_{120}^{(n)} = f_n(V_{120}^{(1)}, V_{120}^{(2)}, V_{120}^{(3)}, \dots) \quad l_1, l_2, \dots \text{为部分低次谐波的次数} \quad (11)$$

2、谐波潮流计算

配电网中实际的谐波情况很复杂,例如一个非线性元件注入的谐波在其他非线性元件中又会产生不同频率的谐波。但当前普遍的做法是,在谐波计算时,把网络中的非谐波源都看作线性元件,只是以谐波源模型来近似包含这些复杂效应,这样便可根据叠加原理对各次谐波单独列线性方程求解。在网络中各元件经对称分量坐标和解耦处理后,谐波求解时就可以分成三序来进行潮流计算。值得说明的是,注入补偿电流等解耦方式的运作仍然需要获得三序的电压量,因此并不能理解为可以只对某序网络独立求解。考虑到高次谐波往往对基波的影响较小,迭代过程中可以忽略这部分谐波的影响,这样能大大减少计算量,因此计算中,只考虑典型低次谐波对基波的影响。算法的基本流程如图3所示:

(1)采用基于对称分量坐标的牛顿-拉夫逊法计算基波正序潮流,基波零序和负序潮流列网络方程 $I=YU$ 求解计算,得到各节点基波修正电压 $V^{(k)}_{120}$;

(2)依据谐波源模型,由节点基波电压 $V^{(k)}_{120}$ 以及各低次谐波电压 $V^{(k)}_{120}$ (初次迭代时取0),获得低次谐波各谐波源的注入电流 $I^{(k)}_{120}$;

(3)对每次谐波分别求解三序的线性方程 $I^{(k)}_{120}=Y^{(k)}_{120}V^{(k)}_{120}$,得各节点该次谐波修正电压 $V^{(k)}_{120}$,如果需要利用修正后的谐波电压重新计算该次谐波的注入电流则返回(2)继续迭代;

(4)检验基波收敛条件,计算各有功功率、无功功率不平衡量,若不收敛则返回(1)继续计算;

(5)各节点基波及低次谐波电压此时已确定,再由谐波源模型和网络方程 $I=YU$ 计算各高次谐波电压 $V^{(k)}_{120}$;

(6)可根据输出要求,确定是否通过坐标变换 $V^{abc}_{120}=T^{abc}_{120}V^{(k)}_{120}$,得到节点各项电压的三相分量。

3、算例

基于文中算法,使用 Microsoft Visual C++ 2005 开发了谐波潮流计算程序,对文献[5]中的一个40节点系统进行计算,系统的各参数及结构图可参考文献[5]。设置其中的第15节点为谐波源,其每相谐波电流注入量为该相基波电流的2%。部分节点的计算结果如下:

表1 部分节点基波计算结果

节点	$ V_a $	$\theta / (^{\circ})$	$ V_b $	$\theta / (^{\circ})$	$ V_c $	$\theta / (^{\circ})$
6	0.9938	-0.0012	0.9937	-122.0947	0.9930	122.0921
7	0.9920	-0.0011	0.9919	-122.0947	0.9906	122.0920
8	0.9932	-0.0012	0.9931	-122.0948	0.9922	122.0921
14	0.9909	-0.0012	0.9904	-122.0944	0.9885	122.0917
15	0.9902	-0.0012	0.9900	-122.0946	0.9879	122.0916
16	0.9920	-0.0012	0.9919	-122.0945	0.9903	122.0920

表2 部分节点谐波计算结果 (n=5)

节点	$ V_a^{(n)} $	$\theta / (^{\circ})$	$ V_b^{(n)} $	$\theta / (^{\circ})$	$ V_c^{(n)} $	$\theta / (^{\circ})$
6	0.0057	0.6838	0.0056	-121.4840	0.0049	122.7265
7	0.0058	0.6827	0.0054	-121.4851	0.0049	122.7250
8	0.0057	0.6868	0.0055	-121.4797	0.0048	122.7300
14	0.0057	0.6865	0.0055	-121.4796	0.0049	122.7301
15	0.0058	0.6912	0.0056	-121.4742	0.0050	122.7348
16	0.0058	0.6938	0.0055	-121.4713	0.0050	122.7369

4、结论

本文在相关文献和研究的基础上,提出了一种基于对称分量解耦的配电网谐波潮流计算方法,通过将三序分量的耦合关系转化为注入电流等补偿形式,建立了电网各元件在基波和谐波下的对称分量解耦模型。算法结合谐波源注入电流的模型,在迭代中忽略对基波影响不大的部分高次谐波,节省了大量计算时间和空间。本文提出的计算方法对于配电网谐波潮流求解时,系统三相不对称造成方程维数过于庞大等问题,提供了一种较好的解决方案。

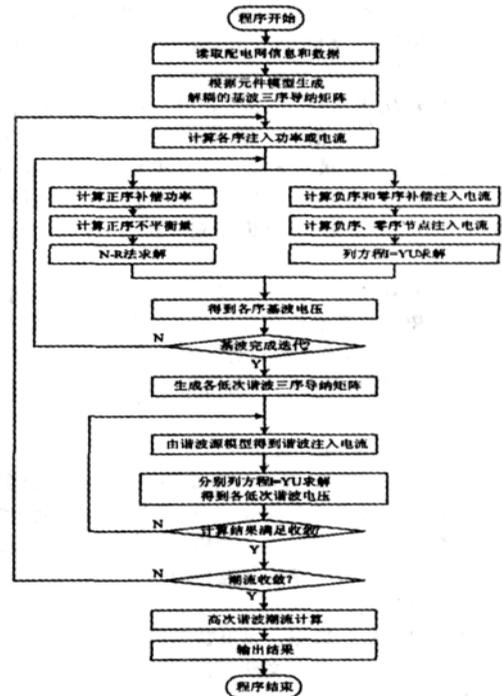


图3 潮流计算流程图

参考文献:

1. 张小平,陈聆. 不对称三相潮流的对称分量分析法. 中国电机工程学报, 1993,13(6):1~12
2. 张小平,陈聆. 三相潮流计算的快速解耦补偿法. 电力系统及其自动化学报,1993,5(1):57~66
3. 吴竟昌. 电力系统谐波. 北京:水利电力出版社,1988.
4. Mamdouh Abdel-Akher, et al. Improved Three-Phase Power-Flow Methods Using Sequence Components. IEEE Transactions on Power Systems, 2005,20(3):1389~1397
5. 颜伟,刘方,王官洁. 三相辐射型配电网的相分量潮流计算. 电力系统自动化,2002,26(10):24~27
6. Hong Ying-Yi, et al. Investigation of Impacts of Different Three-phase Transformer Connections and Load Models on Unbalance in Power Systems by Optimization. IEEE Transactions on Power Systems, 1997,12 (2): 689~697
7. B.K.Chen, et al. Hybrid three phase load flow. IEE Proc, 1990,137(3):177~185
8. 何仰赞,温增银. 电力系统分析(第三版). 武汉:华中科技大学出版社, 2003.