

含PV节点的三相不平衡配电网潮流对称分量分析法

针对配电网的三相不对称性,基于图论的节支关联矩阵和道路矩阵,推导了一种三序分了解耦潮流方法。该算法考虑了配电网三序间弱耦合的特性,通过采用对称分量法实现了配电网三序解耦建模。该算法简化了三相不平衡配电网的复杂性,降低了矩阵的维数,计算过程更简单。针对分布式发电引入配电网,研究了一种处理PV节点的新方法,该方法假定PV节点正序电压幅值保持不变,并基于戴维南等效电路原理,推导了每次迭代时PV节点注入无功功率改变量的计算公式。通过算例结果分析可以看出,所提出的解耦潮流算法和PV节点处理算法具有更好的收敛特性和更快的计算速度。

胡启元 柳维衡 许晓锋 苏小平/国家电网成都供电公司
李红伟/西南石油大学电气信息学院

0 引言

与输电网络相比,配电网络具有三相分布不对称、负荷不平衡和环路少等特点,配电网络的潮流算法需要考虑到这些特征。已有的潮流算法有改进快速解耦法、隐式Zbus高斯法、改进牛顿法和前推回推法^[1-5]。由于前推回推法存储空间要求低,计算速度快,收敛性好,且编程简单,所以在三相配电网潮流计算中被广泛应用。

一般按照三相建模来求解三相不平衡配电网的潮流,除了前面已分析的算法外,文献[6]利用道路矩阵建立了节点电压与注入电流之间的关联公式,实现了三相潮流的直接计算;文献[7]提出了一种基于注入电流分析法的配电网三相

不平衡潮流算法,二者都具有较好的收敛性。另一种常见的分析三相不平衡配电网潮流的方法是采用序分量法,文献[8-10]采用了序分量法求解潮流,通过序分量转换为正序、负序和零序网络,通过对三序间弱耦合的补偿,实现三序之间的解耦求解。相比直接求解,三序分解后的算法准确度变差,但算法实现简单。

分布式电源(DG)接入给电网的潮流、电压质量等带来了很大的影响,尤其是PV节点类型DG的处理对配电网潮流计算带来新的难题。PV节点电压幅值和有功功率输出恒定,但无功功率未知。文献[11-12]采用多端口补偿注入电流法来处理PV节点,取得了较好的效果,但PV节点较多和电压低时迭代次数较多;文献[13]采用了改进牛顿-拉夫逊法来求解,但算法过于复杂,并要求求解雅克比矩阵;文献[14-15]建立了各种分布式电源潮流计算模型,采用了改进前推回代潮流算法实现了含PV节点的三相潮流计算,但其处理PV节点的方法就是文献[11-12]中介绍的方法;文献[16-17]结合基于道路矩阵的潮流算法,分析了两种直接计算PV节点无功功率改变量的方法,取得了较好的效果。

在上述文献的基础上,基于配电网三序间弱耦合的特性,采用对称分量分析法对配电网进行三序解耦建模,提出了一种基于三序对称分量的辐射性配电网三相解耦潮流算法。同时,基于PV节点的特性,研究了一种处理PV节点的新方法,该方法基于戴维南等效电路原



胡启元/高级工程师

关键词/Keywords

潮流计算·
三相不平衡·
PV节点·
对称分量法·

四川省教育厅重点项目资助(15ZA0058),2015年国网四川省电力公司群众性创新科技项目(川电科信[2015]7号文)。

理, 计算了PV节点每次迭代时注入无功功率的改变量, 可简单地直接引入到所提出的三相不平衡系统的潮流计算算法中。基于实际算例对该方法的可行性和有效性进行了测试和对比验证。

1 单相辐射性配电网潮流算法

单相辐射性配电网有 $n+1$ 个节点, 假定首节点是电源且作为参考节点, 则独立节点个数为 n , 支路数 $b=n$ 。此网络可以用基于图论的节支(节点-支路)关联矩阵 $\tilde{A}$ 描述, $\tilde{A}$ 的阶次为 $(n+1) \times b$, $\tilde{A}$ 中的元素定义如下, 即

$$a_{ij} = \begin{cases} -1 & \text{节点} i \text{ 为支路} j \text{ 的出发点} \\ 1 & \text{节点} i \text{ 为支路} j \text{ 的收点} \\ 0 & \text{节点} i \text{ 非支路} j \text{ 的端点} \end{cases} \quad (1)$$

$\tilde{A}$ 有 $n+1$ 个行向量, 每一行与一个节点对应, 表示该节点与哪些支路相关联。 $\tilde{A}$ 有 b 个列向量, 每一列与一条支路对应, 表示该支路与哪两个节点相关联, 每一列只有1和-1两个非零元素, 其余元素都为0。将参考节点对应的行从节-支关联矩阵中删除, 得到 $n \times b(n)$ 的降阶节-支关联矩阵 A 。

考虑节点注入不作为网络中的支路, 并规定节点注入电流以流出节点为正, 支路电流以流出节点为正, 流入节点为负, 记支路电流为 I_b ($b \times 1$)、节点注入电流为 I_g ($n \times 1$ 阶), 即

$$I_g = AI_b \quad (2)$$

求逆有

$$I_b = A^{-1}I_g = T^T I_g \quad (3)$$

式中, T ($T^T = A^{-1}$) 为基于图论描述网络的道路(道路-支路关联)矩阵。

记支路电压为 U_b ($b \times 1$ 阶), 支路阻抗对角阵为 Z_b ($b \times b$ 阶), 则

$$U_b = Z_b I_b = Z_b T^T I_g \quad (4)$$

设定电源节点电压为 U_s , 各节点电压为 U_n ($n \times 1$ 阶), 则任一节点 i 与电源节点的电压差, 等于从此节点开始沿着该节点所在道路到达电源节点所经过支路的支路电压之和, 即

$$\Delta U_{ni} = U_s - U_{ni} = T_i Z_b I_b \quad i=1,2,\dots,n \quad (5)$$

式中, T_i 为节点 i 的道路向量, 即 T 中节点 i 对应道路的行向量。

式(5)为潮流计算的核心, 计算步骤如下。

步骤1: 数据准备。

步骤2: 令 S_i 为节点 i 的注入总功率, Y_i 为节点 i 的并联导纳之和, 得

$$I_{gi} = (S_i / U_{ni})^* - Y_i U_{ni} \quad i=1,2,\dots,n \quad (6)$$

步骤3: 基于式(5)计算 ΔU_{ni} , 则 $U_{ni} = U_s - \Delta U_{ni}$ 。

步骤4: 判断各节点前后两次迭代计算的电压幅值之差是否满足准确度要求, 不满足转至步骤2, 满足结束迭代得到潮流计算结果。

2 不对称三相网络的解耦算法

基于对称分量法, 一组三相不平衡的电流和电压可以分解成零序、正序和负序分量的电流和电压的叠加, 进而形成正序、负序和零序网络3个单相网络来研究, 可简化三相不平衡配电网的复杂性, 降低矩阵的维数, 减少计算量。

记 $a = e^{j2\pi/3}$, $H = [1 \ 1 \ 1; 1 \ a^2 \ a; 1 \ a \ a^2]$, 则电参量的相序变换为(0、1和2分别代表零序、正序和负序; a、b和c分别代表a相、b相和c相)

$$U_{012} = [U_0 \ U_1 \ U_2]^T = H^{-1} U_p = H^{-1} [U_a \ U_b \ U_c]^T \quad (7)$$

$$I_{012} = [I_0 \ I_1 \ I_2]^T = H^{-1} I_p = H^{-1} [I_a \ I_b \ I_c]^T \quad (8)$$

基于欧姆定律并联立式(7)、式(8)可得

$$U_{012} = H^{-1} U_p = H^{-1} Z_p I_p = H^{-1} Z_p H H^{-1} I_p = Z_{012} I_{012} H^{-1} \quad (9)$$

线路阻抗的序分量变换公式为

$$Z_{012} = H^{-1} Z_p H \quad (10)$$

$$\text{式中, } Z_p = \begin{pmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{pmatrix} \text{ 为线路阻抗; } Z_{012} \text{ 为}$$

三序阻抗矩阵。

当配电网三相线路空间对称分布时, Z_{012} 非对角线元素为零; 而空间非对称分布时, Z_{012} 非对角线元素不等于零, 即各序分量之间也存在耦合, 但此时一般非对角线分量远小于对角线分量, 所以将其忽略, 此时对角线上的元素为其零序、正

序和负序阻抗, 即 Z_{012} 可表示为

$$Z_{012} = \text{diag}[Z_0 \quad Z_1 \quad Z_2] \quad (11)$$

式(11)实现了三序阻抗的解耦, 记三相不平衡系统的节点电压为 U_{np} ($3n \times 1$ 阶), 电源点电压为 U_{sp} (3×1 阶), 节点注入电流为 I_{gp} ($3n \times 1$ 阶), 各节点注入的相电流为

$$I_{gpi} = (S_{pi} / U_{npi})^* - Y_{pi} U_{npi} \quad i=1, 2, \dots, n; p=a, b, c \quad (12)$$

利用式(7)计算电源点的三序电压, 利用式(8)计算各节点注入电流的序分量, 然后采用前面介绍的潮流算法分别计算解耦三序单相网络潮流, 计算出各节点的三序电压, 再基于式(7)的逆变换计算出各节点的三相电压, 开始下一次迭代三序解耦迭代。

3 PV节点的处理

PV节点电压幅值恒定、输出有功功率恒定, 并假定只含有正序分量, 但是其输出无功功率未知。迭代时把PV节点的有功功率和无功功率(初始值可设为零)都作为接入节点的负荷功率处理, 现在分析为保证PV节点电压幅值为设定值时注入无功功率改变量的计算。

在PV接入点*i*处设置开环点, 此时对于PV点, 原始正序网络可采用从开环点看进去的戴维南等效电路来处理, 如图1所示。

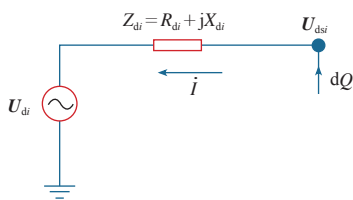


图1 PV节点戴维南等效电路

图1中, U_{di} 为该接入节点*i*潮流计算结果的正序电压; U_{dsi} 为该PV节点的给定电压, 其幅值 U_{dsi} 恒定, 但相位不确定; dQ 为注入无功功率改变量; Z_{di} 为正序戴维南等效阻抗, 其等效于所有节点注入功率为零时的接入点*i*到参考点的支路正序阻抗之和。

设定 T_i 为道路矩阵 T 中节点*i*所对应的行向量, Z_{bi} 为各支路正序阻抗组成的对角阵 ($b \times b$), 则有

$$Z_{di} = R_{di} + jX_{di} = T_i Z_{bi} T_i^T \quad (13)$$

设定 $\delta = \angle U_{dsi} - \angle U_{di}$, $\theta = \angle Z_{di}$, 则视在功率改变量为

$$dS = U_{dsi} \left(\frac{U_{dsi} - U_{di}}{Z_{di}} \right)^* = \frac{U_{dsi}^2}{|Z_{di}|} \angle \theta - \frac{U_{dsi} U_{di}}{|Z_{di}|} \angle (\delta + \theta) \quad (14)$$

展开可求得有功功率和无功功率改变量为

$$dP = \left[U_{dsi}^2 \cos \theta - U_{dsi} U_{di} \cos (\delta + \theta) \right] / |Z_{di}| \quad (15)$$

$$dQ = \left[U_{dsi}^2 \sin \theta - U_{dsi} U_{di} \sin (\delta + \theta) \right] / |Z_{di}| \quad (16)$$

PV节点有功不改变, 即 $dP = 0$, 则由式(15)、式(16)可推得

$$\cos (\delta + \theta) = U_{dsi} \cos \theta / U_{di} \quad (17)$$

$$\sin (\delta + \theta) = U_{dsi} \sin \theta / U_{di} - dQ |Z_{di}| / (U_{dsi} U_{di}) \quad (18)$$

分别把式(17)、式(18)两边平方并对应相加, 整理后可得

$$\left(\frac{|Z_{di}|}{U_{dsi} U_{di}} \right)^2 (dQ)^2 - 2 \frac{|Z_{di}| \sin \theta}{U_{di}^2} dQ + \frac{U_{dsi}^2}{U_{di}^2} = 1 \quad (19)$$

而 $\sin \theta = X_{di} / |Z_{di}|$, 带入式(19), 整理可得(令 $c_1 = X_{di} U_{dsi}^2 / |Z_{di}|^2$, $c_2 = U_{dsi}^2 (U_{dsi}^2 - U_{di}^2) / |Z_{di}|^2$)。

$$(dQ)^2 - 2c_1 dQ + c_2 = 0 \quad (20)$$

求解式(20)可得注入无功功率改变量为

$$dQ = c_1 \pm \sqrt{c_1^2 - c_2} \quad (21)$$

考虑到无功改变量越少越好, 可知式(21)中根号前应取负号, 即

$$dQ = c_1 - \sqrt{c_1^2 - c_2} \quad (22)$$

需要注意的是, PV节点输出无功功率是有界限的, 所以迭代计算潮流时, 若输出无功功率越界, 则将该节点转换成PQ节点(Q取该PV节点的输出无功上界值或下界值)。

4 混合潮流算法计算流程

含PV节点类型DG时, 潮流计算可分两个循环进行: 内循环把PV节点看作PQ节点, 计算三相不平衡网络的潮流分布; 外循环求解无功功率校正量, 更新各PV节点注入无功功率, 然后再转入内循环, 直至满足所有收敛条件。

但一般来讲, PV节点容量较小, 所以在每次迭代时, 其无功功率改变量对整个系统潮流分布影响不会很大, 所以可取消内循环, 即每次迭代

时，首先把PV节点当作PQ节点进行弱环网潮流计算，然后接着计算无功功率增量后开始下一次迭代，这样在每一次迭代过程中同时也更新了各PV节点的无功功率输出。当满足电压准确度和各PV节点正序电压准确度要求后停止迭代，如图2所示。

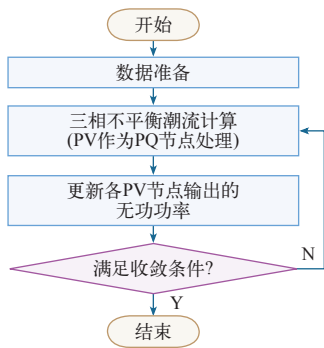


图2 算法简易流程图

5 算例分析

5.1 三相解耦潮流算法效率分析

文献[6]中介绍的6Bus三相不平衡系统，以及文献[17]的13Bus、37Bus和123Bus三相不平衡系统（做了一些改进，忽略了调压器及分散型负荷），基于文献[6]和本文算法的计算结果如表1所示，所用笔记本电脑CPU为奔腾1.73 GHz双核微处理器，内存为1.5 G，计算时间为500次计算求平均值，潮流计算收敛条件为节点电压准确度满足 1.0×10^{-6} (pu)。

表1 潮流计算性能测试结果比较

算例	文献[6]算法		本文算法	
	迭代次数	计算时间/ms	迭代次数	计算时间/ms
6Bus	5	13.0	6	9.7
13Bus	7	26	7	19
37Bus	7	50	7	37
123Bus	7	180	7	135

从表1中可以看出，采用三序解耦计算配电网潮流的收敛性与原来的算法基本一致，但其简化了三相不平衡配电网的复杂性，降低了矩阵的维数，所以计算时间明显减少。

但是，由于不对称网络之间存在弱耦合性，采用三序解耦算法的潮流计算结果与准确值之间

存在一定的误差。不过，从上面的算例计算结果来看，节点电压幅值的最大误差都没有超过0.5%，能够满足实际准确度要求。

5.2 含PV节点算例分析

5.2.1 算例I

文献[6]中介绍的6Bus三相不平衡系统，如图3所示。变压器为YN-yn接线，在Bus3和Bus5接入两个PV型DG系统，线路单位长度阻抗参数与其他线路相同。PV₁和PV₂的有功功率均设定为250 kW，并假定其无功输出无界，潮流计算收敛条件为节点电压准确度满足 1.0×10^{-6} (pu)，PV节点正序电压准确度满足0.01 (pu)。

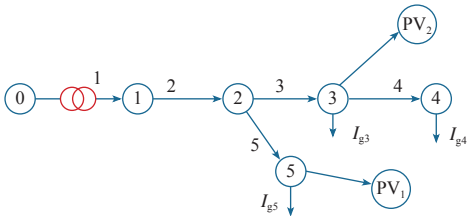


图3 6Bus 2PV系统

采用本文的三相解耦潮流算法，并分别采用本文算法（新算法）、文献[6]算法（算法1）和文献[16]算法（算法2）来处理PV节点，结果如表2所示。

表2 算例I系统潮流收敛后相关计算结果

PV投入	算法	迭代次数	计算时间/ms	PV节点	
				正序电压(pu)	无功功率/kvar
PV ₁	新算法	5	14	0.999 0	541.2
	算法1	5	16	0.998 7	533.6
	算法2	5	11	0.997 1	549.1
PV ₁ ~PV ₂	新算法	5	19	0.994 7, 0.992 6	166.1, 416.4
	算法1	5	22	0.999 2, 0.998 8	202.7, 535.0
	算法2	5	14	0.998 7, 0.997 4	209.3, 549.9

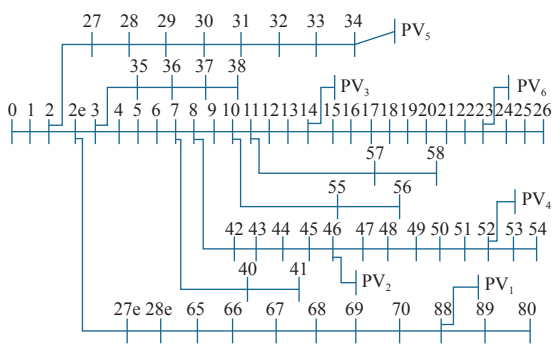
从表2中可以看出，针对本算例，3种算法收敛性能基本相同，算法2（文献[16]算法）所用时间最少，新算法（本文算法）次之，算法1（文献[6]算法）用时较多。针对PV₁投入，达到PV节点正序电压准确度时，3种算法求解的各PV节点的无功功率输出和正序电压基本相同，但仔细对比

可见，算法2计算的无功功率输出比本文算法、算法1计算的无功功率输出大，但电压相比却较差。针对PV₁~PV₂投入，达到PV节点正序电压准确度时，本文算法求解的无功功率输出要小很多（比算法1少155.2 kvar，比算法2少176.8 kvar）。同样，算法2与算法1相比，无功功率输出多，但电压相比较差。

从系统各节点电压分布来看，PV投入后对各节点电压起到了很好的改善作用，投入两个PV节点后电压改善更好。但是，实际PV节点无功功率输出肯定是有限的，不可能达到如此好的效果。另外，本算例节点数较少，PV节点数也少，所以各种算法的性能还需采用较复杂的算例进一步分析。

5.2.2 算例II

文献[6]中介绍的69Bus系统，线路空间对称，三相负荷不平衡，接入6个PV节点，增加5条连接支路，如图4所示。PV节点1~6额定有功功率依次为200 kW、300 kW、250 kW、300 kW、200 kW和250 kW，假定各PV节点输出无功功率上限值等于其有功功率值，下限为零，收敛条件同算例I。



低了矩阵的维数, 计算过程更简单, 所以计算时间明显减少。虽然计算结果与准确值之间存在一定的误差, 但从算例计算结果来看, 误差比较小, 能够满足实际系统准确度要求。

同时, 为了处理常见的PV节点, 研究了一种处理PV节点的新方法, 该方法假定PV节点正序电压幅值保持不变, 并基于戴维南等效电路原理, 推导了每次迭代时PV节点注入无功功率改变量的计算公式。分析算例结果可看出, 所提出的处理PV节点的算法具有更好的收敛特性和更快的计算速度。同时, 算例仿真结果也表明, PV节点的投入对系统电压的改善效果非常明显, 不过对电压的改善效果与PV节点可输出的无功功率大小密切相关。

参考文献

- [1] Zhang F, Cheng C S. A modified newton method for radial distribution system power flow analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12 (1): 389-397.
- [2] Zimmerman R D, Chiang H D. Fast decoupled power flow for unbalanced radial distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10 (4): 2045-2051.
- [3] 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.
- [4] Thukaram D, Banda H M W, Jerome J. A robust three-phase power flow algorithm for radial distribution systems [J]. Electric Power Systems Research, 1999, 50 (3): 227-236.
- [5] Chang G W, Chu S Y, Wang H L. An improved backward/forward sweep load flow algorithm for radial distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22 (2): 882-884.
- [6] 李红伟, 孙宏斌, 张安安, 等. 基于正序分量的含PV节点的三相配电网潮流算法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (1): 115-121.
- [7] Garcia P A N, Pereira J L R, Carneiro S, et al. Three-phase power flow calculations using the current injection method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15 (2): 508-514.
- [8] 张小平, 陈珩. 不对称三相潮流的对称分量分析法 [J]. 中国电机工程学报, 1993, 13 (6): 1-12.
- [9] Abdel-akher M, Nor K M, Rashid A H A. Improved three-phase power-flow methods using sequence components [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20 (3): 1389-1397.
- [10] 黄少伟, 陈颖, 沈沉. 不对称电力系统相序混合建模与三相潮流算法 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (14): 68-73.
- [11] Carol S Cheng, Shirmohammadi D. A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10 (2): 671-679.
- [12] Luo G X, Semlyen A. Efficient load flow for large weakly meshed networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5 (4): 1309-1316.
- [13] 王守相, 黄丽娟, 王成山. 分布式发电系统的不平衡三相潮流计算 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (8): 11-15.
- [14] 丁明, 郭学凤. 含多种分布式电源的弱环配电网三相潮流计算 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (13): 35-40.
- [15] 杨旭英, 段建东, 杨文字, 等. 含分布式发电的配电网潮流计算 [J]. 电网技术, 2009, 33 (18): 139-143.
- [16] 李红伟, 张安安. 含PV型分布式电源的弱环配电网三相潮流计算 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (4): 128-135.
- [17] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.

(收稿日期: 2015-10-14) **EA**