

分布式发电系统的不平衡三相潮流计算

王守相¹, 黄丽娟¹, 王成山¹, 李 东²

(1. 天津大学 电力系统仿真控制教育部重点实验室, 天津 300072;

2. 肥城供电公司, 山东 肥城 271600)

摘要: 传统的配电网潮流算法已不能满足未来分布式发电系统的需求。对常见的各种分布式电源的节点类型进行了划分, 归结为 P 恒定、 U 恒定的 PV 节点; P 恒定、电流幅值 I 恒定的 PI 节点; P 恒定、 U 不定、 Q 受 P 、 U 限定的 $P-Q(V)$ 节点。分别针对这些节点类型的各自特点, 提出了在潮流计算中的处理方法, 其本质是在各迭代步将各类节点转换成为传统方法能够处理的 PQ 节点或 PV 节点。在此基础上, 提出了基于牛顿法的能够处理各种分布式电源的配电网三相潮流计算方法。采用 6 母线系统和 292 母线系统 2 个算例系统进行了测试, 并详细给出了 6 母线系统的计算结果。算例结果证明所提算法具有良好的收敛性能, 潮流计算时间和迭代次数相对于不含分布式电源的系统没有明显增大。

关键词: 分布式发电; 三相潮流; 配电网; 牛顿法

中图分类号: TM 744

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)08-0011-05

0 引言

目前, 分布式发电技术在全球范围迅速发展。在大电网供电的基础上, 在配电系统靠近用户侧引入容量不大(一般小于 50 MW)的分布式电源(DG)供电, 可以综合利用现有资源和设备, 向用户提供可靠和优质的电能^[1-3]。

根据配电网络具有辐射型结构, 存在单相、两相或三相线路, 以及三相负荷经常不平衡的特点, 开发了配电网的三相潮流计算方法, 如前推回推法、隐式 Zbus 高斯法、改进牛顿法、改进快速解耦法等^[4-9], 为配电系统的优化规划和运行提供了基本的分析工具。

当在配电系统中引入分布式电源形成分布式发电系统后, 配电线路中传输的有功和无功功率的数量和方向发生了改变, 配电系统成为一个多电源的系统, 而且不一定能维持严格的辐射型结构。因此, 必须对现有的配电网潮流算法进行改造和调整^[10-14]。文献[10]提出将同步电机和感应电机近似看成 PQ 节点, 并采用 Zbus 高斯法求解带分布式电源的配电网潮流问题。当系统中只有一个电压给定点时, Zbus 高斯法的收敛性能可以与牛顿-拉夫逊法相媲美, 而且占用的存储空间比牛顿-拉夫逊法大为减少。但当系统中不只一个电压给定点时, 算法的收敛性会受到影响。因此, 不利于处理系统中既有平衡节点又有 PV 节点的问题。文献[11]把分布式电源等效成为一个内部电源点加一个电源终端节点, 其中内部节点可以等效成为 PV 节点, 电源终端节点可以等效成

为注入量为 0 的 PQ 节点。在进行潮流计算时采用了牛顿-拉夫逊法。但针对的分布式电源类型单一。文献[12]提出了较为完整的分布式电源的仿真方法, 并用前推回推法计算潮流。用于放射状配电系统的前推回推算法有与牛顿法相似的快速收敛性, 且编程简单, 数值稳定性好, 计算效率高。但如果配电系统带环网或系统中有非恒功率负荷时, 收敛性将恶化, 此外, 也没有实现三相潮流的计算。文献[13]中详细介绍了分布式电源与电网互联的 3 种常见接口形式, 在建立了异步发电机、无励磁调节能力的同步发电机和燃料电池等几种典型分布式电源在潮流计算中的数学模型的基础上, 提出了基于灵敏度补偿的配电网潮流计算方法, 但未计及配电系统的三相不平衡情况。文献[14]采用前推回推算法仅实现了考虑风力发电的配电网潮流计算, 而没有考虑其他类型的分布式电源。

实际配电系统通常是三相不平衡的, 接入系统的分布式电源可能接在三相, 也可能接在单相或两相。实用的分布式发电系统的潮流计算应该计及三相不平衡情况。为此, 现提出可考虑各种分布式电源类型的基于牛顿-拉夫逊法实现的分布式发电系统三相潮流算法。

1 各种分布式电源的节点模型

传统配电网中一般仅包含 2 种节点类型: $V\theta$ 节点和 PQ 节点。变电站出口母线通常视为 $V\theta$ 节点, 而其他节点包括负荷节点和中间节点都视为 PQ 节点。而随着各种分布式电源加入配电网, 系统中出现了新的节点类型, 主要包括: P 恒定、 U 恒定的 PV 节点; P 恒定、电流幅值 I 恒定的 PI 节点; P 恒定、 U

不定, Q 受 P 、 U 限定的 P - Q (V) 节点 (这里 Q (V) 的含义是表示 Q 受 U 的限定和影响)。

进行潮流计算时, 必须针对不同的节点类型采用不同的处理方法。下面分别介绍这 3 种节点类型。

1.1 P 恒定、 U 恒定的 PV 节点

内燃机和传统燃气轮机等分布式电源一般采用同步发电机。所有同步发电机都可以处理成 PV 节点。同步发电机接入电网, 不但改变了节点的功率注入量和节点电压的给定值, 还改变了系统的节点导纳矩阵。一般同步发电机给出的是正序、负序和零序导纳, 可通过序相变化得到相导纳。由此得出, 一个 n 节点系统加入同步发电机后, 原 $3n \times 3n$ 节点导纳矩阵将变成 $(3n+3) \times (3n+3)$ 矩阵, 其中同步发电机的自导纳矩阵用序相变换得出, 与同步发电机相接的节点互导纳也会改变。重新形成节点导纳矩阵后就可以把同步发电机节点当成 PV 节点参与迭代。

另外, 光伏发电系统、部分风力发电机组、微型燃气轮机和燃料电池等分布式电源一般通过逆变器接入电网。在使用逆变器的情况下, 分布式电源可以用输出限定的逆变器来建模。逆变器可以分为电流控制逆变器和电压控制逆变器 2 种。通过电压控制逆变器接入电网的分布式电源也被处理成 PV 节点。

在潮流迭代过程中, 若经过修正后的 PV 节点无功越限, 则将其转换成对应的 PQ 节点。如果在后续迭代中, 又出现该节点电压越界, 重新将其转换成 PV 节点。

1.2 P 恒定、电流幅值 I 恒定的 PI 节点

光伏发电系统、部分风力发电机组、微型燃气轮机和燃料电池等分布式电源在通过电流控制逆变器接入电网时, 将被处理为有功输出和注入电网电流恒定的 PI 节点。相应的无功功率可以由前次迭代得到的电压、恒定的电流幅值和有功功率计算得出:

$$Q_{k+1} = \sqrt{|I|^2 (e_k^2 + f_k^2) - P^2} \quad (1)$$

式中 Q_{k+1} 为第 $k+1$ 次迭代的分布式电源的无功功率值; e_k 、 f_k 分别为第 k 迭代得到的电压的实部和虚部 ($e_k + jf_k = U_k$); I 为恒定的分布式电源的电流相量的幅值; P 为恒定的有功功率值。

进行潮流计算时, 每次迭代前可把 PI 节点的无功注入量求出, 在第 $k+1$ 迭代过程中便可将 PI 节点处理成有功和无功输出分别为 P 和 Q_{k+1} 的 PQ 节点。

1.3 P 恒定、 U 不定、 Q 受 P 、 U 限定的 P - Q (V) 节点

作为分布式电源的风力发电机组更多地采用异步发电机。异步发电机靠电网提供无功功率建立磁场, 因此它没有电压调节能力。考虑到异步发电机在输出有功功率的同时还要从系统吸收一定的无功功率, 其吸收的无功功率的大小与转差率 s 和节点电压 U 的大小有密切的关系^[15], 为了减少网络损耗, 一般采取无功功率就地补偿的原则。通常的做法是在风力发电机组处安装并联电容器组。通过电容器组自动分组投切, 可保证风电场的功率因数符合要求。而电容器组的输出无功也与节点电压幅值有关。因此, 宜用 P - Q (V) 模型表示这类节点。 P - Q (V)

节点给定的输出有功功率 P_e 为异步电机的输出有功功率, 节点电压 U 在每次迭代后都得到修正, 节点的注入无功功率 Q 计算公式如下:

$$s = \frac{r(U^2 - \sqrt{U^4 - 4x_\sigma^2 P_e^2})}{2P_e x_\sigma^2} \quad (2)$$

$$Q' = \frac{r^2 + x_\sigma(x_m + x_\sigma)s^2}{rx_m s} P_e \quad (3)$$

$$Q_C = P_e \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_2} - 1} \right) \quad (4)$$

$$[n] = Q_C / Q_{N-\text{Unit}} \quad (5)$$

$$Q'' = n Q_{N-\text{Unit}} U^2 / U_N^2 \quad (6)$$

$$Q = Q'' - Q' \quad (7)$$

式中 s 为异步电机的转差率; x_σ 为发电机定子电抗 x_1 与转子电抗 x_2 之和; x_m 为励磁电抗; r 为转子电阻; Q' 为异步电机的吸收无功; $\cos \varphi_1$ 、 $\cos \varphi_2$ 分别为异步电机和并联电容器后节点的功率因数, 一般要求在 0.9 以上; Q_C 为并联电容器需要补偿的无功; n 为投入的并联电容器组数; $Q_{N-\text{Unit}}$ 为每组电容器补偿的无功; Q'' 为电容器组实际补偿的无功; Q 为参与潮流迭代的节点注入无功。

在潮流程序中处理此类节点时, 每次迭代后都会对电压进行修正, 并根据修正后的电压幅值计算出异步电机的吸收无功和功率因数, 再根据对节点功率因数的要求得出投入的并联电容器组数, 最后计算出并联电容器实际补偿的无功。发电机吸收无功与补偿无功的差值为节点总的吸收无功。因此, 在下一次迭代前, 都可把 P - Q (V) 节点转换成传统潮流算法能处理的 PQ 节点。

上述几种节点类型的母线可以是单相、两相或三相, 它们分别通过单相、两相或三相线路与系统连接。

2 潮流算法的实现

用 C++ 标准语言, 采用面向对象技术建立了母线、线路、变压器、异步发电机、同步发电机和各种接入电网的逆变器等元件的计算模型, 编制了考虑分布式发电的求解配电系统三相潮流的牛顿-拉夫逊算法。程序的主体都通过 CDSPowerflow 类实现。CDSPowerflow 类的成员函数中包括了完成数据读取、节点编号、节点导纳矩阵形成、牛顿-拉夫逊算法的实现等功能。

2.1 节点导纳矩阵的形成

三相潮流计算不能使用简化成单相的系统模型, 需形成反映三相结构的模型。在配电网中, 一条母线上的 A、B、C 三相算作 3 个节点。在三相间无耦合关系的情况下, 以 A 相节点为例, 一条母线上的 A 相节点的自导纳为所有与此母线相连的 A 相线路的导纳之和, 互导纳为所有既与此母线相连又与其他母线的 A 相相连的 A 相线路的导纳和的负数。如果系统中有同步发电机或线路有互感, 三相将出现耦合情况, 因此节点的自导纳和互导纳都将加上同一母线

上其他两相节点对该节点的影响。

2.2 牛顿-拉夫逊三相潮流算法

含分布式电源的配电网三相潮流的求解最终能化成求解下面的方程:

$$\Delta S = J \Delta U \quad (8)$$

$$\Delta S = [\Delta P, \Delta Q]^T = [\Delta P_1^a, \Delta P_1^b, \Delta P_1^c, \dots, \Delta P_{n-1}^a, \Delta P_{n-1}^b, \Delta P_{n-1}^c, \Delta Q_1^a, \Delta Q_1^b, \Delta Q_1^c, \dots, \Delta Q_{n-1}^a, \Delta Q_{n-1}^b, \Delta Q_{n-1}^c]^T$$

$$\Delta U = [\Delta \theta, \Delta U/U]^T = [\Delta \theta_1^a, \Delta \theta_1^b, \Delta \theta_1^c, \dots, \Delta \theta_{n-1}^a, \Delta \theta_{n-1}^b, \Delta \theta_{n-1}^c, \Delta U_1^a/U_1^a, \Delta U_1^b/U_1^b, \Delta U_1^c/U_1^c, \dots, \Delta U_{n-1}^a/U_{n-1}^a, \Delta U_{n-1}^b/U_{n-1}^b, \Delta U_{n-1}^c/U_{n-1}^c]^T$$

式中 J 为雅可比矩阵; ΔS 为节点的三相有功和无功功率不匹配列向量; ΔU 为节点三相电压的修正列向量。

对 ΔS 的计算需要针对不同的节点类型进行处理。

a. PQ 节点和能转换成 PQ 节点的节点(如 PI 节点和 P-Q(V)节点)。对这一类型的节点需要得到至少本次迭代为恒定数值的有功和无功功率的给定值 P_i^p 和 Q_i^p , 则第 k 次迭代的 $\Delta S^{(k)}$ 的计算如下:

$$\Delta P_i^p = P_i^p - |U_i^p| \left| \sum_{j=1}^n \sum_m |U_j^m| (G_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij}^{pm} + B_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij}^{pm}) \right| \quad (9)$$

$$\Delta Q_i^p = Q_i^p - |U_i^p| \left| \sum_{j=1}^n \sum_m |U_j^m| (G_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij}^{pm} - B_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij}^{pm}) \right|$$

$i=1, 2, \dots, n-1; p=a, b, c; m=a, b, c$

b. PV 节点和能转换为 PV 节点的节点。对这一类型的节点只需得到至少本次迭代为恒定数值的有功功率和电压幅值的给定值 P_i^p 和 U_i^p , 其对应的 ΔU 为 0。则第 k 次迭代的 $\Delta S^{(k)}$ 的计算只需计算其有功功率部分如下:

$$\Delta P_i^p = P_i^p - |U_i^p| \left| \sum_{j=1}^n \sum_m |U_j^m| (G_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij}^{pm} + B_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij}^{pm}) \right| \quad (10)$$

$$i=1, 2, \dots, n-1; p=a, b, c; m=a, b, c$$

解式(8)即可得 ΔU 列向量。用计算得到的 ΔU 的值修正各节点的电压值, 进行下一步迭代, 直至满足收敛判据。

3 算例分析

采用 2 个算例系统: 6 节点系统和 292 节点系统^[16](都为三相不对称配电系统, 且都包含多种类型的分布式电源)进行了测试。先以一个简单的 6 节点三相不对称分布式发电系统作为算例对程序进行测试。把各种分布式电源依次接入系统, 对比潮流计算结果。此系统中平衡节点电压标么值为 1.0, 各母线的负荷如表 1 所示。

表 1 6 母线测试系统中各母线负荷

Tab.1 Bus loads of the 6 - bus test system

母线	A 相		B 相		C 相	
	P/kW	Q/kvar	P/kW	Q/kvar	P/kW	Q/kvar
1001	100	60	100	60	100	60
1002	90	40	90	40	90	40
1003	120	80	0	0	0	0
1004	0	0	60	30	60	30

用所提算法进行潮流计算, 收敛精度取为 10^{-5} 。当未加分布式电源时, 潮流计算总的迭代次数为 3 次, 最后得到线路上流过的总的三相复功率(线路上方所标的复数)和各母线上 A 相电压幅值的标么值(母线编号下方括号内的数据)如图 1 所示。未加分布式电源时的潮流计算结果通过了 IEEE 配电系统分会的辐射配电系统分析包 RDPAC(Radial Distribution Analysis Package)^[17]的验证。

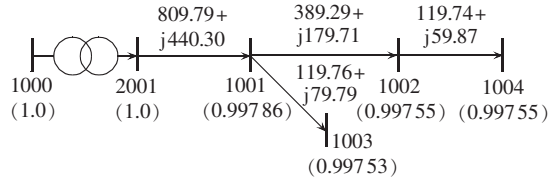


图 1 未加分布式电源的潮流计算结果

Fig.1 Calculative power flows without DGs

下面分 4 种情况测试了加入不同类型的分布式电源后的潮流计算结果。

测试 1 为系统原条件不变, 母线 1002 通过三相线路与母线 3000 连接, 其上挂接通过电压控制逆变器接入电网的微型燃气轮机, 则母线 3000 可视为 PV 母线, 假定其恒定有功功率注入为 150 kW, 恒定的电压幅值标么值为 0.999 9, 最大输出无功为有功的 2 倍, 允许电压偏差为恒定电压幅值的 3%。则用所提算法计算, 迭代次数为 3 次, 无功在第 1 次迭代时超过限值, 节点转化成 PQ 节点进行计算, 即该母线有功输出恒定 150 kW, 无功输出恒定 300 kvar。得到线路上流过的总的三相复功率和各母线上 A 相电压幅值的标么值如图 2 所示。由此也可看出, PV 节点对系统中各节点的电压起支撑作用。

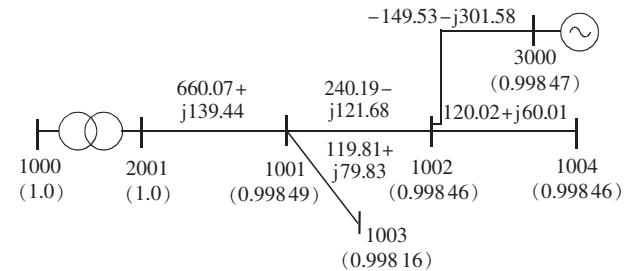


图 2 增加了 PV 节点类型 DG 的潮流计算结果

Fig.2 Calculative power flows with DG of PV node type

测试 2 为系统原条件不变, 母线 1002 通过三相线路与母线 3001 连接, 其上挂接通过电流控制逆变器接入电网的光伏发电系统, 则母线 3001 可视为 PI 母线, 假定其恒定的总输出有功功率为 150 kW, 恒定电流标么值为 0.002。用所提算法计算, 迭代次数为 3 次, 得到线路上流过的总的三相复功率和各母线上 A 相电压幅值的标么值如图 3 所示。同时可看出, PI 节点对系统中各节点的电压起支撑作用。

测试 3 为系统原条件不变, 母线 1002 通过单相(A 相)线路与母线 3002 连接, 其上挂接作为分布式电源的小型风力发电机组, 则母线 3002 可以视为

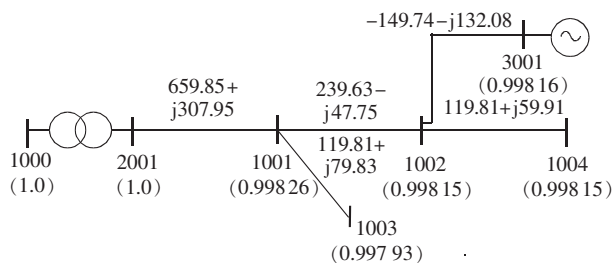


图 3 增加了 PI 节点类型 DG 的潮流计算结果

Fig.3 Calculative power flows with DG of PI node type

P-Q(V) 母线。假设接入的风力发电机组的额定容量为 150 kW, 功率因数为 0.89, 额定电压为 0.69 kV, 经变压器接入配电网。所配并联电容器组的额定电压为 0.69 kV, 单位额定容量为 40 kvar。该母线的功率因数要求大于 0.9。用所提算法计算, 迭代次数为 3 次, 得到线路上流过的总的三相复功率和各母线上 A 相电压幅值的标么值如图 4 所示。

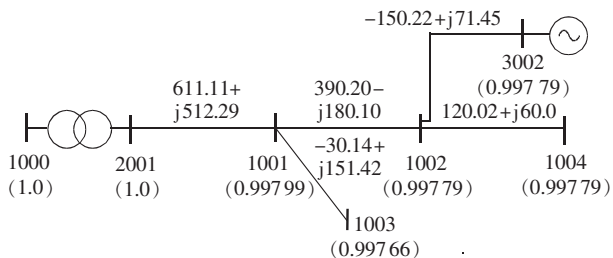


图 4 增加了 P-Q(V) 节点类型 DG 的潮流计算结果

Fig.4 Calculative power flows with DG of P-Q(V) node type

测试 4 为系统原条件不变, 母线 1002 通过三相线路接入母线 3000, 其上挂接通过电压控制逆变器接入电网的微型燃气轮机(具体参数同测试 1); 母线 1003 通过单相(A 相)线路与母线 3002 连接, 其上挂接作为分布式电源的小型风力发电机组(具体参数同测试 3)。这样, 母线 3000 可视为 PV 母线, 而母线 3002 可视为 P-Q(V) 母线。用所提算法计算, 迭代次数为 3 次, 得到线路上流过的总的三相复功率和各母线上 A 相电压幅值的标么值如图 5 所示。该测试验证了算法处理系统中接入多个不平衡分布式电源的可用性。

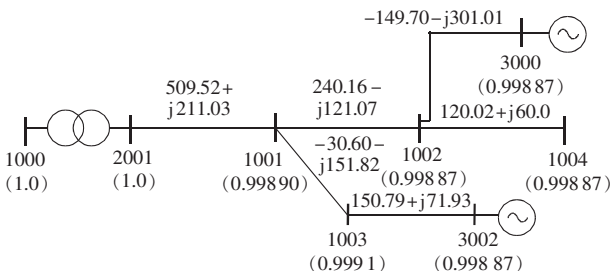


图 5 同时增加了 PV 和 P-Q(V) 节点类型 DG 的潮流计算结果

Fig.5 Calculative power flows with DGs of PV and P-Q(V) node types

综合以上测试结果可以看出:

a. 采用所提算法对含分布式电源的三相不平衡配电网进行潮流计算, 具有良好的收敛性;

b. 在系统有功一定的情况下, 分布式电源若能输出无功功率, 将能减少线路上无功的流动, 对系统中各节点的电压有抬升的作用(如电源 3000 和 3001), 电压升高的多少与无功输出的多少有关。

算法采用了稀疏存储技术, 因而可以用于求解含分布式电源的大规模三相不对称配电系统。采用该算法对作为 NYSEG 配电系统一部分的 292 母线三相不对称系统同时加入多组分布式电源后的潮流进行了分析计算, 计算结果显示迭代次数和程序运行时间并未因分布式电源组数的增多而有明显的增加, 结果是令人满意的。

4 结论

将各种常见的分布式电源所在的节点归结为 PQ 节点、PV 节点、PI 节点、P-Q(V) 节点等几种类型。分别针对这些节点类型的各自特点, 提出在潮流计算中的处理方法, 其本质是在潮流计算的每步迭代中将各种类型的节点转换为传统方法能够处理的 PQ 节点或 PV 节点。

提出的分布式发电系统三相潮流计算的牛顿算法能够处理各种类型的分布式电源, 测试算例表明该潮流算法具有良好的收敛性能, 潮流计算时间和迭代次数相对于不含分布式电源的系统没有明显的增大, 说明该算法是成功和有效的。

参考文献:

- [1] PUTTGEN H B, MACGREGOR P R, LAMBERT F C. Distributed generation: semantic hype or the dawn of a new era? [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2003, 1(1): 22 - 29.
- [2] CHIRADEJA P, RAMAKUMAR R. An approach to quantify the technical benefits of distributed generation [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(4): 764 - 773.
- [3] HADJSAID N, CANARD J F, DUMAS F. Dispersed generation impact on distribution networks [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1999, 12(2): 22 - 28.
- [4] CHENG C S, SHIRMOHAMMADI D. A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 671 - 679.
- [5] 王守相, 王成山. 基于区间算法的配电网三相潮流计算模型 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 52 - 58.
- [6] 王成山, 王守相. 基于区间算法的配电网三相潮流计算及算例分析 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 58 - 62.
- [7] 孙健, 江道灼. 基于牛顿法的配电网 Zbus 潮流计算方法 [J]. 电网技术, 2004, 28(15): 40 - 44.
- [8] SUN Jian, JIANG Dao-zhuo. A Zbus power flow calculation method for distribution network based on Newton method [J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 40 - 44.

- [8] ZHANG Fang, CHENG C S. A modified Newton method for radial distribution system power flow analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 389-397.
- [9] ZIMMERMAN R D, CHIANG H D. Fast decoupled power flow for unbalanced radial distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(4): 2045-2052.
- [10] CHEN T H, CHEN M S, HWANG K J, et al. Distribution system power flow analysis—a rigid approach[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(3): 1146-1152.
- [11] ABUR A, SINGH H, LIU H, et al. Three phase power flow for distribution systems with dispersed generation[C]//14th PSCC. Seville: [s.n.], 2002: 1-7.
- [12] NAKA S, GENJI T, FUKUYAMA Y. Practical equipment models for fast distribution power flow considering interconnection of distributed generators[C]//IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Vancouver, Canada: [s.n.], 2001: 1-6.
- [13] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 35-40.
- CHEN Hai-yan, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong. Study on power flow calculation of distribution system with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 35-40.
- [14] 王守相, 江兴月, 王成山. 含风力发电机组的配电网潮流计算[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 42-45, 61.
- WANG Shou-xiang, JIANG Xing-yue, WANG Cheng-shan. Power flow analysis of distribution network containing wind power generators[J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 42-45, 61.
- [15] FEIJOO A E, CIDRAS J. Modeling of wind farms in the load flow analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 110-115.
- [16] WANG J C, CHIANG H D, DARLING G R. An efficient algorithm for real time network reconfiguration in large scale unbalanced distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 511-517.
- [17] CRUCES L. RDAP user manual, version 3.0, 1999 [EB/OL]. [2006-11-20]. <http://www.zianet.com/whpower>.
- [18] WANG S, HUANG L, WANG C. Unbalanced power flow calculation for distribution systems with distributed generation[C]//Proceedings of CRIS Workshop 2006. Magdeburg, Germany: [s.n.], 2006: 10-14.
- [19] 王守相, 李继平, 王成山, 等. 配电网三相潮流算法比较研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(2): 26-31.
- WANG Shou-xiang, LI Ji-ping, WANG Cheng-shan, et al. Comparison and research on three-phase power flow methods for distribution systems[J]. Proceedings of the EPSA, 2000, 12(2): 26-31.
- [20] 王守相, 王成山, 刘若沁. 基于模糊区间算法的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(20): 19-22, 40.
- WANG Shou-xiang, WANG Cheng-shan, LIU Ru-qin. Distribution networks power flow based on fuzzy interval algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(20): 19-22, 40.
- [21] 王成山, 郑海峰, 谢莹华, 等. 计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 39-44.
- WANG Cheng-shan, ZHENG Hai-feng, XIE Ying-hua, et al. Probabilistic power flow containing distributed generation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 39-44.
- [22] 李蓓, 李兴源. 分布式发电及其对配电网的影响[J]. 国际电力, 2005, 9(3): 45-49.
- LI Bei, LI Xing-yuan. Distributed generation sources and their effects on distribution networks[J]. International Electric Power for China, 2005, 9(3): 45-49.
- [23] 王成山, 马立克. 含风电场电源的配电系统三相潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 21-26.
- WANG Cheng-shan, MALIKI GUINDO. Three-phase unbalanced radial distribution power flow analysis with wind farms considered[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16): 21-26.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

王守相(1973-), 男, 山东高密人, 副教授, 博士, 研究方向为配电系统分析、分布式发电系统分析与仿真、电力系统可靠性评估 (E-mail: sxwang@tju.edu.cn);

黄丽娟(1983-), 女, 广西南宁人, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电系统分析与计算;

王成山(1962-), 男, 天津人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统安全性分析、城市电网规划和配电系统自动化等。

Unbalanced three-phase power flow calculation for distributed power generation system

WANG Shou-xiang¹, HUANG Li-juan¹, WANG Cheng-shan¹, LI Dong²

(1. Key Laboratory of Power System Simulation and Control of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Feicheng Power Supply Company, Feicheng 271600, China)

Abstract: Traditional distribution power flow algorithms can not meet the requirements of DG (Distributed Generation) system. Different distributed generators are classified into three types: PV node with constant P and U , PI node with constant P and I , and P-Q(V) node with constant P , inconstant U and Q determined by P and U , for which different processing methods are proposed according to their properties in power flow calculation. All kinds of nodes are transformed into PQ or PV node, which can be treated by traditional power flow methods during iteration. A three-phase power flow calculation method considering all kinds of DG is thus proposed based on Newton algorithm. The 6-bus and 292-bus test systems are taken as calculation examples and the detailed calculative results of the 6-bus test system are given, which show its good convergence, while its computation time and iteration number are not obviously bigger than those of general power systems.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China (50477035) and the Key Grant Project of Chinese Ministry of Education (306004).

Key words: distributed generation; three-phase power flow; distribution network; Newton algorithm