

# 含分布式电源的配电网潮流计算

陈海焱, 陈金富, 段献忠

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省武汉市 430074)

**摘要:** 分布式电源(DG)的发展给传统的电力系统注入了新的活力。文中介绍了 DG 与电网互联的 3 种常见接口形式,对异步发电机、无励磁调节能力的同步发电机和燃料电池等几种典型 DG 的运行方式和控制特性进行了研究,建立了各自在潮流计算中所需的数学模型,并在此基础上提出了基于灵敏度补偿的配电网潮流计算方法,该方法适合包含各种不同 DG 形式的多电源配电系统。将提出的方法用于 90 节点配电系统进行测试,测试结果表明该方法是可行的。

**关键词:** 分布式电源; 配电网; 潮流计算; 异步发电机; 燃料电池; 电力电子变换器

**中图分类号:** TM744; TM727. 2

## 0 引言

分布式电源(DG)一般分布在配电网,其容量大多在几十 kW~几十 MW 之间<sup>[1]</sup>。按发电能源是否可再生将其分为 2 类<sup>[2]</sup>:一类称为利用可再生能源的 DG,主要包括太阳能光伏、风能、地热能、海洋能等发电形式;另一类称为利用不可再生能源的 DG,主要包括内燃机、热电联产、燃动机、微型燃气轮机、燃料电池等发电形式。

DG 并入配电网对配电系统的网损和电压分布有重要影响<sup>[3,4]</sup>,而潮流计算是对其影响进行量化分析的主要手段。由于目前的配电网潮流计算方法中没有考虑各种形式的 DG<sup>[5]</sup>,因而随着各种不同形式 DG 的并网,配电网潮流计算难度增大,一些传统计算方法将因不能考虑 DG 的影响而失效,为此必须研究能够计及 DG 对配电网影响的潮流计算新方法。

包含 DG 的配电网潮流计算与普通潮流计算的区别之一是 DG 的潮流计算模型与传统发电机组计算模型不一致。传统发电机节点在潮流计算中一般取为 PQ 节点、PV 节点或平衡节点,而 DG 有特殊性,其节点是否能取为这 3 种节点类型需要全面考虑。潮流计算中究竟如何选取 DG 的节点类型目前还没有得到充分研究<sup>[4,6,7]</sup>,这与各种 DG 的运行方式和控制特性不确定有关。文献[4]考虑到特殊负荷、环保和经济等方面的要求,认为 DG 运行在额定工况附近,在潮流计算中将其作为 PQ 节点处理。

文献[6]在潮流分析中建立了异步发电机组的 RX 模型,但是该模型在潮流计算中需要 2 个迭代过程,一个是潮流计算本身的迭代,另一个是转差的迭代。文献[7]认为在潮流计算中 DG 可以作为 PQ 节点或 PV 节点,而储能系统则可以作为恒电流节点处理,但该文没有对具体形式的 DG 展开说明。

本文首先介绍了 DG 与配电网互联的常见接口形式,然后对几种典型 DG 的运行方式和控制特性进行了研究,在此基础上提出了它们在潮流计算中的数学模型;然后分析了目前在配电网中广泛采用的各种潮流计算方法对包含 DG 的配电系统的适应性,并结合 DG 的特点提出了一种新的配电网潮流计算方法;最后在测试算例中对提出的方法进行了验证。

## 1 DG 并网的接口

DG 与配电网互联的接口一般有 3 种形式<sup>[2]</sup>:同步发电机、异步发电机、DC/AC 或 AC/AC 变换器。每种具体形式 DG 的典型容量范围及其与电网的接口形式如表 1 所示。

表 1 DG 的容量及其与电网的接口  
Table 1 Distributed generation capabilities and system interfaces

发电形式	典型容量范围	与电网的常见接口
太阳能光伏	几 W~几百 kW	DC/AC 变换器
风能	几百 W~几 MW	异步发电机
地热能	几百 kW~几 MW	同步发电机
海洋能	几百 kW~几 MW	四象限同步发电机
微型燃气轮机	几十 kW~几 MW	AC/AC 变换器
燃料电池	几十 kW~几十 MW	DC/AC 变换器

其中采用同步发电机作为接口的 DG 又分 2 种子类型<sup>[8]</sup>:励磁电压恒定型和励磁电压可调型。励

收稿日期: 2005-06-02; 修回日期: 2005-08-25。  
高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划项目; 中国博士后科学基金资助项目(2003034473)。

磁电压恒定型 DG 不具有电压调节能力,因而在潮流计算中,采用这种接口形式的 DG 其节点不能作为 PV 节点,发出或吸收的无功与机端电压有关,潮流计算前不能确定,所以也不能看成 PQ 节点;而具有励磁电压调节能力的 DG 可以当成 PV 节点,在潮流计算中处理方法与传统方法相同。异步发电机由于没有励磁系统,需要从系统吸收无功,吸收的无功大小与机端电压有关,因而在潮流计算中异步发电机的处理也需要特殊考虑。对采用 DC/AC 或 AC/AC 变换器接口的 DG 而言,输出的有功、无功与变换器的控制策略有关,潮流计算中需要结合变换器的控制策略对 DG 进行处理。

## 2 DG 在潮流计算中的模型

DG 通常不参与系统的频率调节,所以可认为它们运行在恒定的有功功率模式,至于接口的无功功率和电压运行在什么模式需根据具体情况分析。

### 2.1 异步发电机接口模型

利用风能发电的 DG 一般采用异步发电机并网运行,其简化等值电路如图 1 所示<sup>[6]</sup>。其中,  $x_m$  为激磁电抗,  $x_1$  为定子漏抗,  $x_2$  为转子漏抗,  $x_c$  为机端并联电容电抗,  $R_2$  为转子电阻,  $s$  为转差,定子电阻忽略。

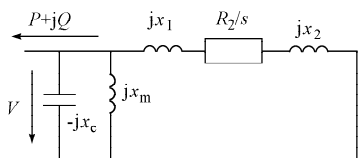


图 1 异步发电机简化等值电路

Fig. 1 Simplified equivalent circuit of induction generator

从图 1 可以推出:

$$V = \sqrt{\frac{-P(s^2 x^2 + R_2^2)}{R_2 s}} \quad (1)$$

$$Q = -\left(\frac{V^2}{x_p} + \frac{Px}{R_2 s}\right) \quad (2)$$

式中:  $x = x_1 + x_2$ ;  $x_p = \frac{x_c x_m}{x_c - x_m}$ 。

对风电场而言,输出的有功功率  $P$  由风速决定,在潮流计算中可以认为是给定值,此时吸收的无功功率  $Q$  与机端电压  $V$ 、转差  $s$  有关,而  $V$  和  $s$  的关系由式(1)决定,于是可推出异步风力发电机吸收的  $Q$  与  $V$  的函数关系式:

$$Q = -\frac{V^2}{x_p} + \frac{-V^2 + \sqrt{V^4 - 4P^2 x^2}}{2x} \quad (3)$$

由此可知,异步发电机节点类型具有如下特点:发出的有功功率是确定值,而无功功率则与机端电

压有关。这与具有电压静特性的负荷节点相似,故本文在潮流计算中称这种电源节点为电压静特性节点,该类型节点在潮流计算中的通用表达式可写成如下形式:

$$\begin{cases} P = P_s \\ Q = f(V) \end{cases} \quad (4)$$

### 2.2 同步发电机接口模型

一般说来,采用有励磁调节能力的同步发电机作为接口的 DG 具有 2 种励磁控制方式,即电压控制和功率因数控制<sup>[9]</sup>。采用电压控制的 DG 在潮流计算中可作为 PV 节点处理,采用功率因数控制的 DG 可以作为 PQ 节点处理。下面讨论采用无励磁调节的同步发电机作为接口的 DG 在潮流计算中的处理方法。考虑隐极机,有下式成立:

$$P_{DG} = \frac{E_{DGq} V}{X_d} \sin \delta \quad (5)$$

$$Q_{DG} = \frac{E_{DGq} V}{X_d} \cos \delta - \frac{V^2}{X_d} \quad (6)$$

式中:  $P_{DG}$ ,  $Q_{DG}$  分别为 DG 的有功输出和无功输出;  $E_{DGq}$  为 DG 机组的空载电势,由于无励磁调节系统,所以  $E_{DGq}$  为常数;  $X_d$  为 DG 机组的同步电抗;  $V$  为机端电压;  $\delta$  为功角。

一般在潮流计算中可以认为 DG 的输出有功是已知的,根据式(5)和式(6)可以推得  $Q_{DG}$  与端电压的关系:

$$Q_{DG} = \sqrt{\left(\frac{E_{DGq} V}{X_d}\right)^2 - P_{DG}^2} - \frac{V^2}{X_d} \quad (7)$$

式(7)与式(3)有类似之处,不同的是式(3)中的  $Q$  小于 0,表明异步发电机实际上是吸收无功,而式(7)中  $Q$  大于 0。可见,对采用无励磁调节能力的同步发电机作为接口的 DG 在潮流计算中也可以作为电压静特性节点处理,同样可以建立形如式(4)的数学模型。

### 2.3 电力电子变换器接口模型

一些 DG 并网运行,需要通过电力电子装置(整流器或逆变器)与系统接口,如燃料电池、太阳能光伏发电、储能系统、微型燃气轮机等<sup>[10]</sup>。其中燃料电池、太阳能光伏和储能系统发出的是直流电,需要通过电压源逆变器与电网接口,而微型燃气轮机发出的是高频交流电,需要通过 AC/DC/AC 或 AC/AC 变频后才能并网。下文主要介绍燃料电池发电站的并网结构及其控制方式,然后对其在潮流计算中的处理方法给出建议。

并网的燃料电池发电站一般由燃料电池、功率调节单元(PCU——power condition unit)以及升压变压器等部分组成,其中 PCU 主要由 DC/AC 换流

器、电压控制环节和功率控制环节组成<sup>[11,12]</sup>。并网燃料电池发电站常见等值电路如图2所示。图中： $U_{FC}$ 为电池输出的直流电压； $R_{FC}$ 为电池的内阻； $m$ 为换流器的调节指数； $\Psi$ 为换流器点燃角(或超前角)； $V_{ac}$ 为换流器输出的交流电压； $X_T$ 为变压器等值电抗； $V_s$ 为系统母线电压； $\delta$ 与 $\theta$ 为电压的相角，且满足 $\Psi = \delta - \theta$ 。

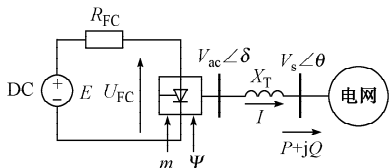


图2 燃料电池发电站与电网互联的等值电路  
Fig.2 Equivalent circuit of grid-connected fuel cell

$V_{ac}$ 幅值与 $V_{FC}$ 有如下关系：

$$V_{ac} = mU_{FC} \quad (8)$$

由图2和式(8)可以推出下式：

$$P = \frac{V_{ac}V_s}{X_T} \sin(\delta - \theta) = \frac{mU_{FC}V_s}{X_T} \sin \Psi \quad (9)$$

$$Q = \frac{V_s V_{ac} \cos \Psi}{X_T} - \frac{V_s^2}{X_T} = m \frac{V_s U_{FC} \cos \Psi}{X_T} - \frac{V_s^2}{X_T} \quad (10)$$

与常规的同步发电机不同，燃料电池发电站没有原动机调速器和励磁调节器，它的有功功率和无功功率控制通过控制参数 $\Psi$ 和 $m$ 实现。PCU换流器的超前角 $\Psi$ 可以由燃料流量进行控制，通过对燃料流量的控制实现对燃料电池有功输出功率的控制，这与常规发电机通过调节气门/导水叶开度实现有功调节原理类似；而对无功功率的控制则是通过调整PCU换流器的调节系数 $m$ 实现，这与常规发电机调节励磁电流来控制其无功输出原理相似。因而，在潮流计算中，燃料电池发电站并网节点可以作为PV节点处理( $P, V_s$ 已知，见图2)。

设换流器输出的额定有功功率为 $P_N$ ，最小功率因数 $\rho_{\min}$ ，则换流器的最大容量为：

$$S_{\max} = \frac{P_N}{\rho_{\min}} \quad (11)$$

于是，换流器在输出有功功率 $P$ 时对应的最大无功输出为：

$$Q_{\max} = \sqrt{S_{\max}^2 - P^2} \quad (12)$$

燃料电池发电站正常运行时不需要从系统吸收无功，可以认为发出最小无功 $Q_{\min}$ 为0。在潮流计算中，如果燃料电池发电站并网节点的无功越限，可以将该节点作为PQ节点处理，此时的无功注入为无功输出的上限或下限值。

### 3 算法研究

传统的配电网潮流算法主要分为3种类型<sup>[13]</sup>：直接法、前推回代法和牛顿拉夫逊法。直接法又称Zbus或Ybus法，它基于节点电压的迭代计算，在每次迭代过程中要用到叠加原理<sup>[14]</sup>，该方法具有较强的处理弱环网的能力，而且适合处理具有电压静特性的节点类型，但是对含PV节点的网络则不能有效处理。前推回代法面向单电源的辐射状网络，具有易编程、计算效率高等优点，该方法也能有效处理电压静特性的节点类型，但是对弱环网或对包含DG的多PV节点网络则处理不便，需要用到补偿技术<sup>[15]</sup>。牛顿拉夫逊法在输电网潮流计算中得到了广泛应用，它同样也适合于配电网的潮流计算，但是该方法对电压初值非常敏感，由于配电网靠近末端的节点电压往往偏低，导致该方法收敛性较差，另外在配电网中具有大的 $R/X$ ，故雅可比矩阵不能实现解耦。

鉴于传统直接法不能处理PV节点的缺陷，本文结合DG的特点，在直接法的基础上，提出一种基于灵敏度矩阵的补偿算法，在每一迭代过程中，根据灵敏度矩阵和PV节点电压幅值不匹配量对PV节点无功进行修正。

本文的灵敏度矩阵 $M$ 定义如下：

$$M \Delta \bar{Q} = \Delta \bar{V} \quad (13)$$

式中： $\Delta \bar{Q}$ 和 $\Delta \bar{V}$ 分别为PV节点无功注入修正向量和电压幅值不匹配向量。

不妨设系统节点1~ $n$ 为PV节点，PV节点的注入电流幅值增量和电压幅值增量的关系可以近似用下式表示：

$$\begin{bmatrix} |Z_{11}| & |Z_{12}| & \cdots & |Z_{1n}| \\ |Z_{21}| & |Z_{22}| & \cdots & |Z_{2n}| \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ |Z_{n1}| & |Z_{n2}| & \cdots & |Z_{nn}| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \Delta I_2 \\ \vdots \\ \Delta I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中： $Z_{ii}$ 为第 $i$ 个PV节点的自阻抗； $Z_{ij}$ 为第 $i$ 个PV节点和第 $j$ 个PV节点之间的互阻抗； $\Delta I_i$ 和 $\Delta V_i$ 分别为第 $i$ 个PV节点的注入电流幅值增量和电压幅值增量。

由于PV节点电压标么值接近1.0，而且配电网节点电压相角很小，故

$$\Delta \bar{Q} = \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} \approx - \begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \Delta I_2 \\ \vdots \\ \Delta I_n \end{bmatrix} \quad (15)$$

所以，灵敏度矩阵 $M$ 可以用下式表示：

$$\mathbf{M} = - \begin{bmatrix} |Z_{11}| & |Z_{12}| & \cdots & |Z_{1n}| \\ |Z_{21}| & |Z_{22}| & \cdots & |Z_{2n}| \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ |Z_{n1}| & |Z_{n2}| & \cdots & |Z_{nm}| \end{bmatrix} \quad (16)$$

$Z_{ii}$  和  $Z_{ij}$  是系统节点阻抗矩阵中相应位置的元素,配电网节点阻抗矩阵容易形成,故灵敏度矩阵  $\mathbf{M}$  的求取也是十分方便的。

基于灵敏度矩阵的潮流算法流程如下:

1)读取系统原始数据,形成节点阻抗矩阵和灵敏度矩阵  $\mathbf{M}$ ;

2)设置所有 PQ 节点和电压静特性节点电压  $\mathbf{V}^{(0)} = 1.0 \angle 0^\circ$ , PV 节点初始电压  $\mathbf{V}^{(0)} = \mathbf{V}_s \angle 0^\circ$  ( $\mathbf{V}_s$  是指定电压幅值),然后初始化 PV 节点无功  $\mathbf{Q}^{(0)} = (\mathbf{Q}_{\max} + \mathbf{Q}_{\min})/2$  ( $\mathbf{Q}_{\max}$  和  $\mathbf{Q}_{\min}$  是 PV 节点的无功上下限),设迭代次数  $k=1$ ;

3)平衡节点单独作用,其余节点注入为 0,计算各节点电压  $\mathbf{V}_1$ ;

4)计算各节点(包括 PQ 节点、PV 节点、静特性节点)注入电流,平衡节点对地短路,计算此时除平衡节点外各节点的电压  $\mathbf{V}_2$ ;

5)应用叠加原理求出各节点电压  $\mathbf{V}^{(k)} = \mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2$ 。若各 PQ 节点和电压静特性节点满足  $\max\{|\mathbf{V}^{(k)} - \mathbf{V}^{(k-1)}|\} < \epsilon$ , 且 PV 节点满足  $\max\{|\mathbf{V}^{(k)} - \mathbf{V}_s|\} < \epsilon$  ( $\epsilon$  为计算精度),则计算收敛,进入步骤 6,否则更新各 PQ、PV 节点和静特性节点电压,即令  $\mathbf{V}^{(0)} = \mathbf{V}^{(k)}$ ,根据 PV 节点电压幅值不匹配量和灵敏度矩阵计算无功功率修正量,更新各 PV 节点的注入无功功率,令  $k=k+1$ ,转入步骤 3;

6)计算结束,输出潮流计算结果。

至于 PV 节点的无功功率越界问题,可以采用传统的方式处理,即在迭代过程中,若经过修正后的 PV 节点无功越限,将其转换成对应的 PQ 节点。如果在后续迭代中,又出现该节点电压高于(对应于无功越上界)或低于(对应于无功越下界)PV 节点的指定电压幅值,重新将其转换成 PV 节点。需要注意的是,在节点转换过程中,同时要求更新修正 PV 节点无功的灵敏度矩阵  $\mathbf{M}$ 。

4 算例分析

本文采用图 3 所示的 90 节点配电系统进行分析,该系统支路参数见文献[16],本文采用了不同的节点编号(其中节点 1 为平衡节点),各节点负荷大小取为文献[16]的 5 倍。基准功率为 100 MW,计算精度为  $\epsilon=10^{-4}$ ,PV 节点指定电压幅值标幺值均为 1.0。

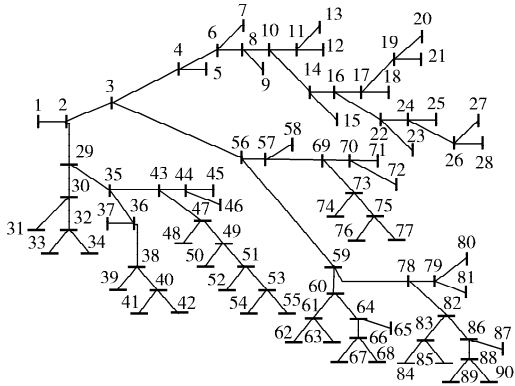


图 3 90 节点配电系统  
Fig. 3 90-bus distribution power system

下文 I 型 DG 表示采用异步发电机接口的电源, II 型 DG 表示采用无励磁调节的同步发电机为接口的电源, III 型 DG 表示采用变换器作为接口的燃料电池。I 型 DG 和 II 型 DG 在潮流计算中均作为电压静特性节点处理, III 型 DG 在潮流计算中作为 PV 节点处理。为验证本文所提出的方法,在图 3 所示的 90 节点系统中进行了测试,测试结果如表 2、表 3 所示。

4.1 多种 DG 并网对潮流收敛性的影响测试

表 2 是 III 型 DG 个数对算法迭代次数的影响结果,从中可以看出,随着 III 型 DG 数的增多,迭代次数并没有明显增加。另外,本文还采用 A、B、C 这 3 种方案分析比较各种型式的 DG 混合并网对潮流计算收敛性的影响。其中方案 A 表示节点 16 接有 10 台并联运行的 I 型 DG,方案 B 表示在方案 A 基础上在 47 节点接 1 台 II 型 DG,方案 C 表示在方案 B 的基础上在 82 节点接入 1 台 III 型 DG。计算结果为:方案 A、B、C 对应的迭代次数分别为 3、3、6。此结果表明本文提出的算法处理多种形式 DG 混合并网的配网潮流计算是有效的。

表 2 III 型 DG 个数对迭代计算的影响  
Table 2 Impact of the number of III type DG on convergency

III 型 DG 数	DG 位置	迭代次数	计算时间/s
0		3	1.390
1	57	4	1.390
2	57,16	5	1.402
3	57,16,47	5	1.403
4	57,16,47,82	5	1.406

4.2 程序自动转换 PV 到 PQ 节点的能力测试

在系统 22 节点安装一台 III 型 DG,其输出有功功率标幺值为 0.5,无功功率范围为 (0,0.75)。在第 2 次迭代过程中,经过灵敏度矩阵修正后的无功

功率为 0.764,超过了上限,程序在第 3 次迭代过程中自动将其转换为 PQ 节点,转换后迭代 2 次潮流收敛,计算结果为 22 节点输出无功 0.75,节点电压为  $0.997\ 804\angle -0.753\ 01^\circ$ 。若将 22 节点 DG 的无功功率范围扩大到 (0,0.9),则程序共迭代 4 次收敛,潮流计算结果为  $0.999\ 99\angle -0.604\ 11^\circ$ , $Q=0.77$ 。

#### 4.3 不同形式 DG 并网对馈线段电压分布的影响分析

设馈线段 1,2,3 的路径分别为 16-22-24-26-28,47-49-51-53-55,82-86-88-89-90,在不同方案下,馈线段 1,2,3 的节点电压分布情况如表 3 所示。可以看出:Ⅲ型 DG 对系统电压支撑能力最强,其次是Ⅱ型 DG,而Ⅰ型 DG 则降低了系统电压水平。

表 3 采用不同 DG 接入方案前后部分节点电压计算结果比较

Table 3 Comparison of nodal voltage under different cases		节点电压			
馈线段	节点	方案 0	方案 A	方案 B	方案 C
1	16	0.918 1	0.912 1	0.913 7	0.949 5
	22	0.905 9	0.899 8	0.901 4	0.937 7
	24	0.903 7	0.897 5	0.899 1	0.935 5
	26	0.900 9	0.894 7	0.896 3	0.932 8
	28	0.898 5	0.892 2	0.893 9	0.930 4
2	47	0.939 2	0.938 1	0.975 7	0.984 6
	49	0.938 9	0.937 9	0.975 5	0.984 5
	51	0.937 9	0.936 9	0.974 5	0.983 4
	53	0.937 5	0.936 5	0.974 1	0.983 0
	55	0.937 3	0.936 4	0.974 0	0.982 9
3	82	0.947 4	0.945 3	0.946 9	1.000 0
	86	0.946 4	0.944 3	0.945 8	0.999 0
	88	0.945 7	0.943 6	0.945 1	0.998 2
	89	0.945 2	0.943 1	0.944 7	0.997 8
	90	0.945 0	0.943 0	0.944 6	0.997 8

注:方案 0 表示没有 DG 接入配电网的情况。

## 5 结语

由于 DG 形式众多,在潮流计算中如何考虑 DG 的模型,需要对各种不同形式 DG 的运行模式和控制特性进行分析。本文在分析 3 种典型 DG 运行特点的基础上,对它们在潮流计算中的处理方法进行了研究,提出了基于灵敏度补偿的潮流算法,在 90 节点系统中进行了大量测试,得到了如下结论:

1)采用异步发电机或无励磁调节的同步发电机作为接口的 DG 在潮流计算中可以采用静特性模型求解,而燃料电池发电站则可以作为 PV 节点处理。

2)基于灵敏度补偿的改进直接算法适合包含多种分布式电源的配电网潮流计算,能够有效处理电压静特性节点和 PV 节点,而且具有自动处理 PV

节点无功越限的能力。

3)采用异步发电机作为接口的分布式电源会降低系统电压水平,而燃料电池和同步发电机对系统电压具有支撑作用。

## 参考文献

- [1] 梁才浩,段献忠.分布式发电及其对电力系统的影响.电力系统自动化,2001,25(12):53—56.  
LIANG Cai-hao, DUAN Xian-zhong. Distributed Generation and Its Impact on Power System. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12): 53—56.
- [2] PUTTGEN H B, MACGREGOR P R, LAMBERT F C. Distributed Generation: Semantic Hype or the Dawn of a New Era? IEEE Power and Energy Magazine, 2003, 1(1): 22—29.
- [3] WANG Cai-sheng, NEHRIR M H. Analytical Approaches for Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Power Systems. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 2068—2076.
- [4] 王志群,朱守真,周双喜,等.分布式发电对配电网电压分布的影响.电力系统自动化,2004,28(16):56—60.  
WANG Zhi-qun, ZHU Shou-zhen, ZHOU Shuang-xi et al. Impacts of Distributed Generation on Distribution System Voltage Profile. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 56—60.
- [5] 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.电力系统自动化,2000,24(20):19—22,40.  
WANG Shou-xiang, WANG Cheng-shan, LIU Ruo-qin. Fuzzy Interval Algorithm Based Computation of Power Flow in Distribution Network. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(20): 19—22, 40.
- [6] FEIJÓO A E, CIDRÁS J. Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 110—115.
- [7] ZHU Y, TOMSOVIC K. Adaptive Power Flow Method for Distribution Systems with Dispersed Generation. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(3): 822—827.
- [8] LOSI A, RUSSO M. Dispersed Generation Modeling for Object-oriented Distribution Load Flow. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 1—9.
- [9] FREITAS W, VIEIRA J C M, MORELATO A et al. Influence of Excitation System Control Modes on the Allowable Penetration Level of Distributed Synchronous Generators. IEEE Trans on Energy Conversion, 2005, 20(2): 474—480.
- [10] LASSETER R. Dynamic Models for Micro-turbines and Fuel Cells. In: Proceedings of IEEE Power Engineering Society 2001 Summer Meeting, Vol 2. Vancouver (Canada): 2001. 761—766.
- [11] HATZIADONIU C J, LOBO A A, POURBOGHRAT F et al. A Simplified Dynamic Model of Grid-connected Fuel-cell Generators. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(2): 467—473.
- [12] SEDGHISIGARCHI K, FELIACHI A. Dynamic and Transient Analysis of Power Distribution Systems with Fuel Cells Part I: Fuel-cell Dynamic Model. IEEE Trans on Energy

Conversion, 2004, 19(2): 423—428.

- [13] LOSI A, RUSSO M. Object-oriented Load Flow for Radial and Weakly Meshed Distribution Networks. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1265—1274.
- [14] CHEN T H, CHEN M S, HWANG K J et al. Distribution System Power Flow Analysis—A Rigid Approach. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(3): 1146—1152.
- [15] LUO G X, SEMLYEN A. Efficient Load Flow for Large Weakly Meshed Networks. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(4): 1309—1316.
- [16] GOSWAMI S K, BASU S K. Direct Solution of Distribution Systems. IEE Proceedings—Generation, Transmission and

Distribution, 1991, 38(1): 78—88.

陈海焱(1979—),男,博士研究生,主要研究方向为含分布式电源的电力系统规划与分析计算。E-mail: chenhaiyan\_415@163.com

陈金富(1972—),男,博士,副教授,主要研究方向为电力系统规划、运行及 FACTS 应用技术。E-mail: jinfu\_chen@263.net

段献忠(1966—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统分析、FACTS 技术及信息技术应用。E-mail: xzduan@263.net

### Study on Power Flow Calculation of Distribution System with DGs

CHEN Hai-yan, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The development of distributed generation (DG) has brought new challenges to traditional power systems. Three familiar interfaces between DG and power grid are described in this paper. The operation modes and control characteristics of typical DG, including the asynchronous generator, synchronous generator with constant values of excitation voltage and fuel cell, are studied and their models in power flow calculations are presented. Based on the above, a new algorithm for the calculation of distribution power flow is presented, which uses the sensitivity compensation method and is available to calculate distribution power flow with multi-source and multi-type DGs. An example of 90-node system has proved the feasibility of the method proposed.

This work is supported by the Teaching and Research Award Program for Outstanding Young Teachers in Higher Education Institutions of China, and the Post-doctoral Science Foundation of China (No. 2003034473).

**Key words:** distributed generation; distribution network; power flow calculation; asynchronous generator; fuel cell; power converter

(上接第 28 页 continued from page 28)

余贻鑫(1936—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统安全性和稳定性、配电规划和配电自动化、电力市场。

王东涛(1965—),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统的安全性和稳定性。

### Transient Stability Probability of Power System

FU Chuan, YU Yi-xin, WANG Dong-tao

(Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** To calculate the probability of system transient instability is a basic step in the probabilistic assessment of power system security. Based on the outcomes of study on the dynamic security region (DSR), a transient instability probability model combining discrete and continuous stochastic variables is proposed. In addition to considering the uncertainties of load forecasting at each node, the fault occurrence location and the fault-clearing time, the uncertainty of load model is also taken into account. Furthermore, the method of Gram-Charlier progression based on the cumulants is adopted to calculate the joint probabilistic distribution of truncated normal distribution, which is closer to real case. Arithmetic examples demonstrate the high calculation efficiency of the approach proposed.

This work is jointly supported by the Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217904), the Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 50595413) and Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (No. 20030056008).

**Key words:** stability probability; dynamic security region (DSR); uncertainty of load model; truncated normal distribution; Gram-Charlier progression