

DOI: 10.7667/PSPC160227

换流器限流状态下的配电网潮流计算方法

杨杉, 同向前, 王海燕, 邓亚平

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 在利用潮流计算方法分析配电网的电压稳定性时, 由于换流器本身的限流作用, 当配电网电压下降到一定程度后, 换流器并网型分布式电源可能进入限流状态。因此, 引入一种新的 $I\theta$ 节点模型对运行于限流状态下的换流器型分布式电源进行等效, 同时提出一种含 $I\theta$ 节点配电网的潮流计算方法。该方法根据 $I\theta$ 节点功率平衡方程的变化, 利用牛顿迭代法, 构造新的雅克比矩阵和修正方程组对配电网潮流进行计算。最后在 IEEE33 节点标准算例中对所提潮流计算方法进行了验证。算例结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 配电网; 换流器; 潮流计算; 限流状态; 节点类型

Power flow calculation for distribution network under the current limiting status of grid-connected inverter

YANG Shan, TONG Xiangqian, WANG Haiyan, DENG Yaping

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: If the voltage stability of distribution network is analyzed according to power flow calculation method, inverter based distributed generation could get into the current limiting status after distribution network voltage drops to a certain degree due to its inverter's current limiting function. So a novel $I\theta$ bus model is introduced to describe the inverter based distributed generation under current limiting status. Meanwhile a power flow calculation method based on the $I\theta$ bus type is proposed. According to the variation of bus power equation of $I\theta$ bus and the Newton iteration method, a new Jacobian matrix and correction equations are established to calculate the power flow. Finally, some tests are done in a typical IEEE33 distribution network to verify the proposed method. The results show the method is correct and accurate.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507139), the Key Discipline Special Foundation of Shaanxi Province (No. 5X1301), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20126118110009).

Key words: distribution network; inverter; power flow calculation; current limiting status; bus type

0 引言

换流器型分布式电源(Inverter Based Distributed Generation, IBDG)在配电网中的应用非常广泛, 例如: 光伏发电和直驱型风力发电^[1-2]的接入改变了配电网原有的潮流分布, IBDG 本身的随机性也使得配电网在正常运行时的潮流分布情况更加复杂。此外, 潮流计算是配电网优化运行、能量管理以及电压分布与电压稳定性分析的基础^[3-6]。因此, 研究含

IBDG 配电网的潮流计算具有重要的现实意义。

目前, 含 IBDG 配电网的潮流计算方法已有一些研究成果。在模型等效方面, 换流器的控制方式影响了 IBDG 的等效模型。不同的控制方式下, 其潮流计算等效模型不同。当采用恒功率控制时, IBDG 可以为本地负荷提供恒定的有功与无功, 潮流计算时等效为 PQ 节点; 采用恒电压控制时, IBDG 用来稳定电网电压, 潮流计算时等效为 PV 节点, 在无功越限的情况下, 再从 PV 节点转变为 PQ 节点^[7-9]。如何处理 IBDG 的潮流计算模型是正确计算潮流的关键。目前的潮流计算方法中, 主要将 IBDG 等效为 PQ 节点或者 PV 节点。在计算方法方面, 与传统潮流计算相同, 主要采用前推回代法, 牛顿法

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51507139); 陕西省重点学科建设专项基金(5X1301); 高等学校博士学科点专项科研基金(20126118110009)

等^[10-12]。其中需要对前推回代法进行特殊处理，使其可以处理 PV 节点^[13-14]。

但是，当采用潮流计算方法分析含 IBDG 配电网的电压稳定性时，通常采取的做法是连续增加配电网的负荷或者 IBDG 输出的有功功率，计算配电网节点电压的变化轨迹，以确定配电网的电压稳定区域^[15-17]。而 IBDG 的潮流计算等效模型与其换流器的控制策略有关。当配电网负荷或者 IBDG 输出功率的变化造成 IBDG 的并网点电压降低后，换流器可能进入限流状态，此时 IBDG 输出的电流是恒定的。当 IBDG 运行在恒定功率因数情况下时，IBDG 需要等效为 $I\theta$ 节点。潮流计算作为求解配电网运行状态的基本运算，必须考虑到换流器的限流作用造成 IBDG 节点类型的变化，因此研究含 $I\theta$ 节点配电网的潮流计算方法很重要。

当配电网含有 $I\theta$ 节点后，由于节点类型的增加，原来的潮流计算方法不再适用。牛顿迭代法是常用的解非线性方程组的方法，本文根据牛顿迭代法的原理，在雅克比矩阵中增加与 $I\theta$ 节点相关的量，形成新的雅克比矩阵，并建立新的可适用于求解含 $I\theta$ 节点配电网的潮流修正方程式。最后对算法进行了验证。

1 潮流计算模型

潮流计算模型的正确性决定了潮流计算在工程实例分析应用中的正确性。IBDG 的潮流计算模型与换流器的控制方式有关，而换流器本身的限流作用会造成在配电网某些运行场景下，换流器不能按照它的控制目标输出。此时，传统的 PQ 节点与 PV 节点等效计算模型不再适用。

IBDG 的潮流计算模型需要考虑到换流器的控制策略。带有限流功能的换流器在恒功率控制方式下的控制原理图如图 1 所示。

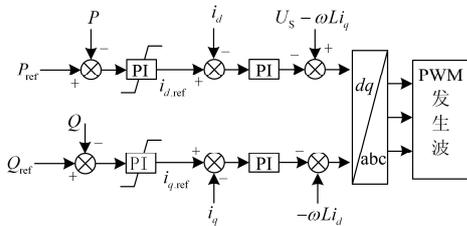


图 1 换流器控制原理图

Fig. 1 Control principle chart of inverter

图中， P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为 IBDG 输出有功功率和无功功率的参考值； P 、 Q 分别为 IBDG 输出有功功率、无功功率的实际值； U_s 为并网点电压值； i_d 、 i_q

分别为换流器输出电流的 dq 分量； $i_{d,ref}$ 、 $i_{q,ref}$ 分别为 i_d 、 i_q 的电流指令值。根据瞬时功率理论，IBDG 与电网交换的有功功率与无功功率分别为

$$\begin{cases} P = U_s i_d \\ Q = U_s i_q \end{cases} \quad (1)$$

在配电网正常运行时，根据 IBDG 的并网要求，IBDG 并网换流器的功率因数应该在一定范围内动态可调。例如光伏电站的并网标准中，要求光伏电源的并网换流器应满足额定有功出力下功率因数在超前 0.95~滞后 0.95 的范围内动态可调^[18]，因此 IBDG 可以工作于恒定功率因数输出模式。

在进行电压稳定性分析的过程中，需要改变配电网中负荷的大小，而负荷的增加会影响到配电网各节点的电压值，包括 IBDG 的并网点电压。根据式(1)可以看到，若 IBDG 工作在恒功率控制下，当并网点电压下降时，IBDG 的输出电流值会增加，由于换流器本身的限流作用，当超过换流器能够输出的最大电流时，IBDG 的输出电流值不再增加，维持其能够输出的最大值，通常为其额定电流的 1.2~1.5 倍。

在单位功率因数控制模式下 IBDG 输出的电流与并网点电压之间的夹角恒为 $\theta=0^\circ$ ，而在纯无功补偿(STATCOM 模式)模式下 IBDG 输出的电流与并网点电压之间的夹角恒为 $\theta=\pm 90^\circ$ ，即 θ 为定值。当 IBDG 进入限流状态后，其输出电流大小恒定，因此 IBDG 在换流器进入限流状态后可等效为 $I\theta$ 节点。 I 为 IBDG 输出电流的限幅值， θ 为输出电流与并网点电压之间的夹角。此外，本文主要研究将 IBDG 等效为 $I\theta$ 节点配电网的潮流计算，并不分析其何时进入限流状态。下文所提到的 IBDG 在配电网中的接入点都默认其节点类型为 $I\theta$ 节点。

2 潮流计算算法

2.1 含 $I\theta$ 节点配电网的功率平衡方程

当配电网中接入 IBDG 以后，配电网中的节点有系统电源节点，负荷节点和 IBDG 接入节点。针对每一个节点，可以列出极坐标形式的节点功率方程为

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_{Gi} - Q_{Li} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $i=1, 2, \dots, n$ ， n 为配电网的节点个数； P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为节点 i 的电源发出的有功和无功功率； P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为节点 i 的负荷的有功和无功功率； U_i 为节点 i 的电压幅值； $P_{Gi}-P_{Li}$ 为节点 i 注入的有功

功率; $Q_{Gi}-Q_{Li}$ 为节点 i 注入的无功功率; $\delta_{ij}=\delta_i-\delta_j$ 为节点 i 与节点 j 电压的相角差; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵的实部与虚部。

针对方程组(2), 每个节点都有 4 个变量, 即: 节点注入的有功功率 $P_i=P_{Gi}-P_{Li}$, 节点注入的无功功率 $Q_i=Q_{Gi}-Q_{Li}$, 节点电压幅值和相位。根据配电网节点的特点, 平衡节点作为潮流计算的参考节点, 电压幅值和相位是已知的, 而注入的有功功率和无功功率是未知的。负荷节点为 PQ 节点, 节点注入功率已知, 而电压幅值和相位是未知的。可见, 平衡节点和 PQ 节点都只有 2 个未知数。而 I θ 节点, 其节点注入功率以及电压幅值和相位都未知, 有 4 个未知数。需要说明的是, 当 $\theta=0^\circ$ 时, $Q_{Gi}=0$, 节点注入无功功率已知, 未知数个数减少 1 个, IBDG 可等效为 QI 节点; 或者当 $\theta=\pm 90^\circ$ 时, $P_{Gi}=0$, 节点注入有功功率已知, 未知数个数同样减少 1 个, IBDG 可等效为 PI 节点。但这两种节点类型只能处理 $\theta=0^\circ$ 或 $\pm 90^\circ$ 的特殊情况。因此, 本文为了潮流计算模型的通用性, 将限流后的 IBDG 等效为 I θ 节点。于是, 方程组(2)中。未知数个数大于方程个数, 不能利用过去的潮流计算方法直接进行计算, 而需要一定的改进。

对于 I θ 节点, 已知接入该节点的 IBDG 的注入电流值 I_i 以及该电流与该节点电压之间的相角差 θ_i , 即功率因数角。因此, I θ 节点的节点功率方程可修改为

$$\begin{cases} U_i I_i \cos \theta_i - P_{Li} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ U_i I_i \sin \theta_i - Q_{Li} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (3)$$

由方程组(3)可以看到, 每个 I θ 节点的未知数可以由之前的 4 个变为 2 个。设 PQ 节点的个数为 m 个, 则 I θ 节点个数为 $n-m-1$, 且分别按照先 PQ 节点后 I θ 节点的顺序进行排列, 联立 PQ 节点和 I θ 节点的功率平衡方程, 即

$$\begin{cases} \Delta P_1(x) = P_{Gi} - P_{Li} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ \Delta P_2(x) = U_i I_i \cos \theta_i - P_{Li} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ \Delta Q_1(x) = Q_{Gi} - Q_{Li} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \\ \Delta Q_2(x) = U_i I_i \sin \theta_i - Q_{Li} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (4)$$

$\Delta P_1(x)$ 和 $\Delta Q_1(x)$ 中 $i \in 1, 2, \dots, m$, $\Delta P_2(x)$ 和 $\Delta Q_2(x)$ 中 $i \in m+1, m+2, \dots, n-1$, 即下标 1 代表

PQ 节点, 下标 2 代表 I θ 节点。由式(4)可以看到, 该方程组有 $2 \times (n-1)$ 个方程, 未知数个数也为 $2 \times (n-1)$, 因此含有 I θ 节点的潮流计算是可解的。潮流计算需要求解的方程组为非线性方程, 因此本文采用目前常用的牛顿法进行求解。

2.2 含 I θ 节点配电网的潮流计算

牛顿法求解潮流计算的核心问题是修正方程式的建立和求解。根据牛顿法的求解过程, 形成修正方程式如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & N_{11} & N_{12} \\ H_{21} & H_{22} & N_{21} & N_{22} \\ M_{11} & M_{12} & L_{11} & L_{12} \\ M_{21} & M_{22} & L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_2 \\ \Delta U_1/U_1 \\ \Delta U_2/U_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}$$

求解修正方程式的重点是雅克比矩阵 J 的形成。由于在潮流计算中增加了 I θ 节点, 因此过去潮流计算的雅克比矩阵不能直接应用, 应该重新形成。从式(5)可以看到, 雅克比矩阵由 4 个子阵组成, 即 H, M, N, L 。根据雅克比矩阵的形成方法可以得到, H 矩阵和 N 矩阵中对角线元素和非对角线元素的计算表达式与传统潮流计算相同。即

$$H_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \delta_j} = -U_i U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (6)$$

$$H_{ii} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \delta_i} = U_i \sum_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (7)$$

$$M_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_j} = U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (8)$$

$$M_{ii} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_i} = -U_i \sum_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (9)$$

$$i \in 1, 2, \dots, n-1$$

而 N 和 L 矩阵中, 由于 I θ 节点的引入使得矩阵内对角线元素的计算表达式与传统的潮流计算不同, 而非对角元素的计算表达式与传统潮流计算相同。具体的计算表达式如下, 非对角元素:

$$N_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j} U_j = -U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (10)$$

$$L_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_j} U_j = -U_i U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (11)$$

$$i \in 1, 2, \dots, n-1$$

N_{ii} 对角线元素, 当 $i \in 1, 2, \dots, m$ 时

$$N_{ii} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_i} U_i = -U_i \sum_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) - 2U_i^2 G_{ii} \quad (12)$$

当 $i \in m+1, m+2, \dots, n-1$ 时,

$$N_{ii} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_i} U_i = U_i I_i \cos \theta_i - U_i \sum_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) - 2U_i^2 G_{ii} \quad (13)$$

对角元素 L_{ii} , 当 $i \in 1, 2, \dots, m$ 时,

$$L_{ii} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_i} U_i = -U_i \sum_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) + 2U_i^2 B_{ii} \quad (14)$$

当 $i \in m+1, m+2, \dots, n-1$ 时,

$$L_{ii} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_i} U_i = U_i I_i \sin \theta_i - U_i \sum_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) + 2U_i^2 B_{ii} \quad (15)$$

雅克比矩阵 J 形成后, 给定待求的各节点电压幅值与相位的初始值, 分别为: $\delta_1^{(0)} = \delta_2^{(0)} = 0^\circ$, $U_1^{(0)} = U_2^{(0)} = 1$ 。根据修正方程式(5)求出 $\Delta P_1^{(0)}$, $\Delta P_2^{(0)}$, $\Delta Q_1^{(0)}$ 和 $\Delta Q_2^{(0)}$ 的值, 再修正各节点的电压幅值与相位, 即

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_1^{(k)} \\ \Delta \delta_2^{(k)} \\ \Delta U_1^{(k)} / U_1^{(k)} \\ \Delta U_2^{(k)} / U_2^{(k)} \end{bmatrix} = - (J^{(k)})^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta P_1^{(k)} \\ \Delta P_2^{(k)} \\ \Delta Q_1^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \delta_1^{(k+1)} = \delta_1^{(k)} + \Delta \delta_1^{(k)} \\ \delta_2^{(k+1)} = \delta_2^{(k)} + \Delta \delta_2^{(k)} \\ U_1^{(k+1)} = U_1^{(k)} + \Delta U_1^{(k)} \\ U_2^{(k+1)} = U_2^{(k)} + \Delta U_2^{(k)} \end{cases} \quad (17)$$

然后将式(17)代入式(16), 继续进行计算, 直到 $\max |\Delta P_1^{(k)}, \Delta P_2^{(k)}| < \varepsilon$ 且 $\max |\Delta Q_1^{(k)}, \Delta Q_2^{(k)}| < \varepsilon$ 时迭代结束。最后得出待求的各节点电压的幅值与相位后, 再与平衡节点的电压幅值与相位结合, 可根据式(4)进一步求出各节点的注入功率。若 i 节点中还有负输出功率, 则 i 节点中 IBDG 的注入功率为

$$\begin{cases} P_{Gi} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) + P_{Li} \\ Q_{Gi} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) + Q_{Li} \\ i \in m+1, m+2, \dots, n-1 \end{cases} \quad (18)$$

3 算例分析

本文采用 IEEE33 节点标准算例进行验证, 算例的具体参数见文献[19]。该算例是一个 10 kV 的配电网系统, 在节点 11, 17, 28 和 33 分别接入 0.5 MW 的 IBDG, 如图 2 所示, 其额定电流为 28.86 A。假设本文的基准功率为 100 kVA, 基准电压为 10 kV, IBDG 可以输出的最大电流为其额定电流的 1.2 倍。在额定状态下 IBDG 输出的有功功率为 5 p.u., 电流为 5 p.u.。节点 1 为平衡节点, 它的电压幅值为 1 p.u., 电压相角为 0° 。

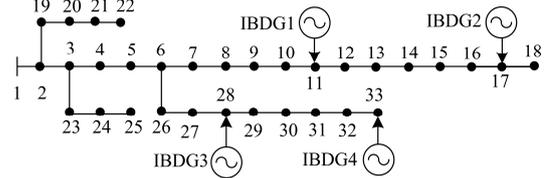


图 2 IEEE33 节点配电网结构图

Fig. 2 IEEE33 bus distribution network

为了验证本文所提的含 i 节点配电网的潮流计算方法的正确性, 假设每个 IBDG 接入节点都为 i 节点且每个 IBDG 都进入限流模式, IBDG1 工作于单位功率因数输出模式, 其 $I=6$, $\theta=0^\circ$, IBDG2 输出的功率因数为 -0.95, 其 $I=6$, $\theta=18.19^\circ$, IBDG3 输出的功率因数为 0.97, 其 $I=6$, $\theta=14.07^\circ$, IBDG4 输出的功率因数为 0.95, 其 $I=6$, $\theta=18.19^\circ$ 。通过潮流计算得到各节点电压分布, 如图 3 所示。IBDG 的并网点注入功率及 IBDG 输出功率的计算结果见表 1。

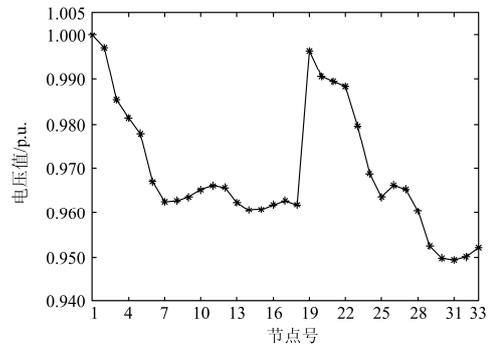


图 3 各节点的电压分布

Fig. 3 Voltage profile of each bus

表 1 $I\theta$ 节点注入功率与 IBDG 输出功率Table 1 Injection power and output power from IBDG of $I\theta$ bus

IBDG 编号	IBDG 输出功率/p.u.		节点注入功率/p.u.	
	P	Q	P	Q
IBDG1	5.7971	0	5.3471	-0.3000
IBDG2	5.4896	-1.8009	4.8896	-2.0009
IBDG3	4.6586	1.1648	4.0586	0.9648
IBDG4	4.5236	1.4841	3.9236	1.0841

为了验证本文所提方法的正确性, 将计算得到的 IBDG 的输出功率, 在传统的潮流计算方法中, 以 PQ 节点模型进行潮流计算, 得到各节点的电压分布, 如图 4 所示。

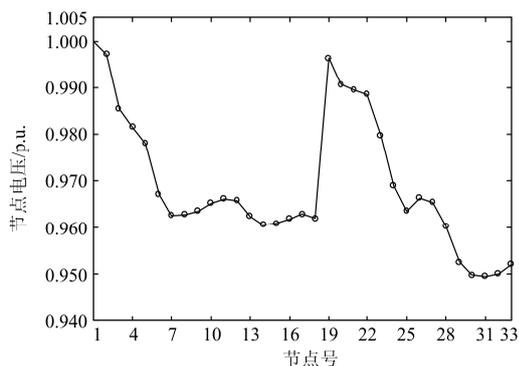


图 4 各节点的电压分布

Fig. 4 Voltage profile of each bus

通过图 3 和图 4 可以看出, 使用本文所提方法与使用传统潮流计算方法在相同算例中, 计算结果相同。为了说明所提计算方法的准确性, 进一步计算了两种计算方式下各节点电压标幺值的绝对值误差, 得出最大误差为 0.682×10^{-4} 。验证了所提方法的正确性, 该方法可适用于任何含有 $I\theta$ 节点配电网的潮流计算。

4 结论

本文研究了当换流器进入限流状态后, IBDG 等效为 $I\theta$ 节点时配电网的潮流计算方法, 通过理论分析与算例验证可以得出如下结论。

1) 利用潮流计算分析配电网的电压稳定性时, 若 IBDG 并网点电压下降过大, 可能会造成换流器进入限流状态。此时, IBDG 可能不能维持原有的恒功率控制方式, 不能继续将 IBDG 等效为 PQ 节点或者 PV 节点。在功率因数已知的情况下 IBDG 可等效为 $I\theta$ 节点。

2) 当配电网中含有 $I\theta$ 节点时, 由于 $I\theta$ 节点的功率平衡方程与传统潮流计算不同, 传统的牛顿-拉夫逊潮流计算方法不能直接应用。对于新增的 $I\theta$

节点, 需要根据 $I\theta$ 节点的功率平衡方程形成新的修正方程式, 再对该修正方程式进行求解, 完成潮流计算。

参考文献

- [1] 崔红芬, 汪春, 叶季蕾, 等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 91-97.
CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 91-97.
- [2] 马亚辉, 李欣然, 徐振华, 等. 一种逆变并网型分布式电源统一模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 145-154.
MA Yahui, LI Xinran, XU Zhenhua, et al. A unified model of grid-connected distributed generation through inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 145-154.
- [3] 刘东, 陈云辉, 黄玉辉, 等. 主动配电网的分层能量管理与协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5500-5506.
LIU Dong, CHEN Yunhui, HUANG Yuhui, et al. Hierarchical energy management and coordination control of active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5500-5506.
- [4] NADERI E, SEIFI H, SEPASIAN M S. A dynamic approach for distribution system planning considering distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1313-1322.
- [5] 郭小璇, 龚仁喜, 鲍海波, 等. 含新能源电力系统机会约束经济调度的二阶锥规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 85-91.
GUO Xiaoxuan, GONG Renxi, BAO Haibo, et al. Second-order cone programming method of chance constrained economic dispatch considering renewable energy sources[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 85-91.
- [6] NAGAO T, TANAKA K, TAKENAKA K. Development of static and simulation programs for voltage stability studies of bulk power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1): 273-281.
- [7] ZHU Y, TOMSOVIC K. Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(3): 822-827.
- [8] LI S. Power flow modeling to doubly-fed induction generators (DFIGs) under power regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3292-3301.
- [9] 周家南, 苏宏升. 计及负荷电压静特性的含分布式电

- 源的前推回代潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 26-32.
- ZHOU Jianan, SU Hongsheng. Back/forward sweep power flow calculation with distributed generation considering static load characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 26-32.
- [10] 刘杨华, 吴政球. 孤岛运行的微电网潮流计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 16-20.
- LIU Yanghua, WU Zhengqiu. Study on power flow calculation method for islanding micro grids[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 16-20.
- [11] BHARGAVA A, PANtT V, DAS B. An improved power flow analysis technique with STATCOM[C] // Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2006. PEDES'06. International Conference on. IEEE, 2006: 1-5.
- [12] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [13] LUO G X, SEMLYEN A. Efficient load flow for large weakly meshed networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(4): 1309-1316.
- [14] 胡晓松, 张殷, 谢光彬, 等. 含 PV 节点的配电网合环潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 8-13.
- HU Xiaosong, ZHANG Yin, XIE Guangbin, et al. A loop closing power flow calculation algorithm of distribution network with PV nodes[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 8-13.
- [15] 邹志翔, 周克亮, 袁晓冬. 风电场接入对周边地区电网电压稳定性的影响分析[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 50-56.
- ZOU Zhixiang, ZHOU Kelian, YUAN Xiaodong. Analysis on influences of grid-connected wind farm on voltage stability of local power network neighboring to connection point[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 50-56.
- [16] GUERRICHE K R, BOUKTIR T. Maximum loading point in distribution system with renewable resources penetration[C] // Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2014 International. IEEE, 2014: 481-486.
- [17] 吴昊, 卫志农, 王成亮, 等. 基于连续潮流综合算法的电压稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 99-104.
- WU Hao, WEI Zhinong, WANG Chengliang, et al. Voltage stability study based on synthesis method of continuous power flow[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 99-104.
- [18] GB/T 19964-2012 光伏电站接入电力系统技术规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [19] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2014.

收稿日期: 2016-02-25; 修回日期: 2016-07-10

作者简介:

杨 杉(1986-), 女, 博士研究生, 主要从事分布式发电技术和微电网技术方面的研究工作; E-mail: 54803510@qq.com

同向前(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统的电力电子控制技术;

王海燕(1980-), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事分布式发电运行控制及微电网能量管理等方面的研究工作。

(编辑 姜新丽)