

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240919

# 基于牛顿法和拟牛顿法自适应结合的高比例新能源 接入电网故障计算方法

郑涛, 曲荣淇, 陈云飞, 艾静雯

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

**摘要:** 高比例新能源接入电网给电力系统安全稳定运行带来了新的挑战。现有的短路电流计算方法难以满足电力系统快速计算的需求, 当新能源的渗透率增加时可能出现收敛性变差的问题。提出了一种基于牛顿法和拟牛顿法自适应结合的高比例新能源接入电网故障计算方法。首先, 分析了新能源的控制策略对短路电流的影响, 建立了新能源故障稳态阶段的等效模型。其次, 针对牛顿类迭代算法计算速度与收敛性难以同时满足的问题, 建立了新能源接入场景下迭代算法的不收敛预判与效率判据。根据自适应选择判据在收敛性和效率的约束下选择算法实现故障电流的求解。最后, 采用含新能源的改进 IEEE33 节点算例进行验证。结果表明, 与传统方法相比, 所提计算方法在计算速度和收敛性方面均具有优越性。

**关键词:** 分布式新能源; 短路电流计算; 迭代计算方法; 收敛性

## Fault calculation method for a power grid with high penetration of renewable energy based on adaptive combination of Newton and quasi-Newton methods

ZHENG Tao, QU Rongqi, CHEN Yunfei, AI Jingwen

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources  
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

**Abstract:** The high penetration of renewable energy into power grids introduces new challenges to the safe and stable operation of power systems. Existing short-circuit current calculation methods struggle to meet the speed requirements of modern power systems and often suffer from poor convergence as renewable energy penetration increases. This paper proposes a fault calculation method for power grids with high renewable energy integration, based on the adaptive combination of Newton and quasi-Newton methods. First, the influence of renewable energy control strategies on short-circuit current is analyzed, and an equivalent model for the steady-state fault condition of renewable energy sources is established. Then, to address the challenge of balancing computational speed and convergence in Newton-type iterative algorithms, non-convergence prediction and efficiency criteria are developed for renewable-rich scenarios. An adaptive selection mechanism is proposed to switch between Newton and quasi-Newton methods based on convergence and efficiency constraints, enabling accurate fault current computation. Finally, an improved IEEE33-bus test system with renewable energy integration is used for verification, and the results show that the proposed calculation method offers better performance in both computational speed and convergence than traditional methods.

This work is supported by the Joint Fund of National Natural Science Foundation of China (No. U2166205).

**Key words:** distributed renewable energy; short-circuit current calculation; iterative calculation method; convergence

## 0 引言

随着高比例新能源接入电网, 大量的电力电子

化设备和新能源复杂的控制策略对电网的故障特征带来了新的挑战<sup>[1-3]</sup>。新能源分散接入电网, 使原来系统的单电源结构变成多电源结构, 同时不同类型的新能源电流与电压之间存在非线性耦合关系<sup>[4-5]</sup>, 使得电流的大小和流向更加复杂, 传统同步发电机

**基金项目:** 国家自然科学基金联合基金项目资助 (U2166205)

的短路电流计算方法难以适应高比例新能源接入电网场景的需要。因此,亟需研究适用于高比例新能源接入电网的故障分析与短路电流计算新方法,为保护选型与定值整定计算提供基础。

新能源电源输出的短路电流与其类型和控制策略有关<sup>[6-7]</sup>,新能源电源电流与电压具有非线性关系,因此新能源接入电网的故障计算需要采用迭代法,目前的研究大多基于不动点迭代法。文献[8-10]基于叠加定理法将网络分成正常网络和故障网络,将节点电压方程与故障点边界条件联立后采用不动点迭代法求解短路电流。但是当高比例新能源接入电网后,复杂的控制策略使得不动点迭代法的收敛性能难以满足要求,可能存在迭代不收敛的情况<sup>[11-12]</sup>。为了改善迭代算法的性能,文献[13]将短路电流计算过程表述为稀疏线性方程求解,采用简单的广义最小残差方法求解网络节点电压和短路电流。文献[14]基于理想变压器和多端口网络理论,提出了一种精确计算低电阻接地系统在多重故障下新能源故障电流的迭代校正算法;文献[15]采用二阶收敛的牛顿法,得到短路故障后电网初始节点电压范围,但是每次迭代都要重新计算雅可比矩阵,计算量太大。文献[16]利用构造递推关系代替雅可比矩阵的拟牛顿法进行计算,相较牛顿法加快了计算速度,但收敛性降低。

随着电网规模增大,接入电网的新能源数量和容量增加,短路电流计算更加复杂,对计算方法的快速性和收敛性要求越来越高。针对牛顿法雅可比矩阵计算量大、拟牛顿法收敛性下降的问题,本文提出一种基于牛顿法和拟牛顿法自适应结合的高比例新能源接入电网故障计算方法。首先,分析了新能源的控制策略对不同故障跌落电压下短路电流的影响,建立了考虑抑制负序控制策略的逆变型新能源故障稳态阶段的等效模型;其次,在牛顿法迭代算法基础上,考虑到牛顿法和拟牛顿法在收敛性和计算速度上存在的差异,建立了新能源接入场景下迭代算法的自适应选择判据,根据判据选择算法实现故障电流的求解。与传统方法相比,本文创新点概括如下。

1) 建立不收敛预判据,保证在迭代过程中,当收敛性下降到接近不收敛状态时采用收敛阶较高的算法迭代以保证收敛性。

2) 建立效率判据,考虑到两种算法的收敛次数和单次计算速度不同时,算法的计算总时长存在差异,选择效率高的算法进行迭代计算。

最后,以含新能源的改进 IEEE33 节点电网为例,将所提故障计算方法与传统方法得到的结果进

行对比分析,结果验证了本文所提故障计算方法在计算速度和收敛性方面的优越性。

## 1 逆变型新能源故障稳态等效模型

逆变型新能源电源通常以集群场站的形式接入电网,当多个新能源场站分散接入电网时,可以将新能源场站进行等效,建立适用于短路计算的逆变型新能源稳态短路电流模型。故障稳态期间,衰减分量衰减完毕,建立稳态短路电流模型仅需考虑稳态工频分量<sup>[17]</sup>。场站等效后可认为是单机模型或者多台等值机组组成的等效模型。本文的逆变型新能源以光伏电源为例进行说明,光伏电源接入 IEEE33 节点电网示意图如图 1 所示。

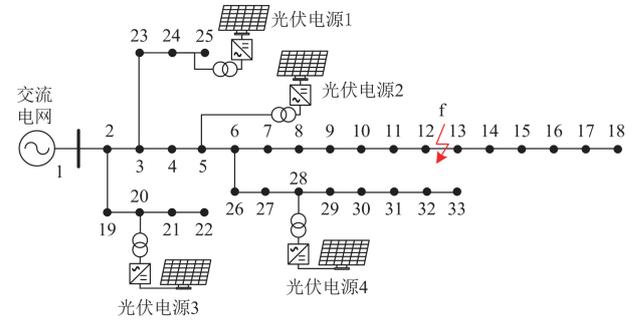


图 1 光伏电源接入 IEEE33 节点电网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of photovoltaic power source connected to IEEE33-bus power grid

光伏电源多采用 PQ 控制方式和低穿控制策略,其注入电网的电流与并网点电压存在着非线性的耦合关系。以抑制负序的低穿控制策略为例进行分析,认为故障稳态阶段新能源输出的短路电流实际值与低穿控制指令值相同,故障短时间内,近似认为新能源输出功率保持不变。光伏电源的短路计算模型为<sup>[18]</sup>

$$\begin{cases} I_{DG,d} = I_N & U_{pcc} \geq 0.9 \\ I_{DG,d} = \sqrt{I_{\max}^2 - I_q^2} I_N & 0.2 \leq U_{pcc} < 0.9 \\ I_{DG,d} = 0 & U_{pcc} < 0.2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_{DG,q} = 0 & U_{pcc} \geq 0.9 \\ I_{DG,q} = K_1(0.9 - U_{pcc}) I_N & 0.2 \leq U_{pcc} < 0.9 \\ I_{DG,q} = I_{\max} I_N & U_{pcc} < 0.2 \end{cases} \quad (2)$$

$$I_{DG} = (I_{DG,d} + jI_{DG,q})e^{j\theta_U} \quad (3)$$

式中:  $I_{DG}$  为光伏电源的输出电流;  $I_{DG,d}$ 、 $I_{DG,q}$  分别为光伏电源的有功电流、无功电流;  $I_N$  为额定电流;  $U_{pcc}$  为并网点电压;  $\theta_U$  为机端电压相位;  $K_1$  为

控制无功电流的系数, 一般取 1.5~2;  $I_{\max}$  为变流器允许的最大电流值, 一般取 1.05~1.2。本文选取  $K_1$  为 1.5,  $I_{\max}$  为 1.05。

不同厂家的新能源模型的  $K_1$  和  $I_{\max}$  可能不同, 在实际计算中可以根据厂家提供的数据或者经验值进行调整。根据控制策略得到光伏电源的电流与故障后电压的关系如图 2 所示。

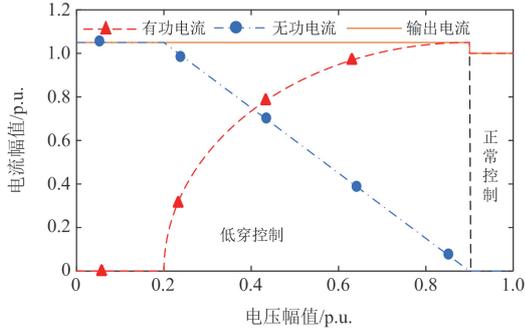


图 2 光伏电源电流与故障后电压的关系

Fig. 2 Relationship between photovoltaic power current and post-fault voltage

在故障过程中, 光伏电源故障稳态短路电流为分段函数, 优先保证注入无功电流以帮助新能源电压恢复, 当电压跌落比较严重时, 限幅环节保证电流不超过变流器允许的最大电流值。光伏电源的短路电流与机端电压存在函数关系, 其稳态短路电流的等效模型可以采用压控电流源的形式表示, 如图 3 所示。

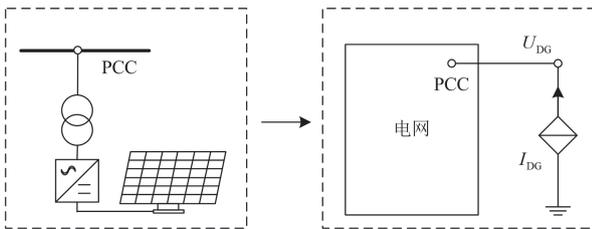


图 3 逆变器型新能源等效模型

Fig. 3 Inverter-type renewable energy equivalent model

本节建立了适用于含新能源电力系统短路计算的新能源数学模型, 但是将新能源电源由恒流源模型改为压控电流源模型后, 电网的计算规模变大, 当高比例新能源接入电网后, 可能出现计算时间长或者计算不收敛的问题, 下面将对适用于高比例新能源接入电网的故障计算方法展开研究。

## 2 高比例新能源接入电网故障计算方法

### 2.1 考虑新能源接入的常规故障计算方法

不含新能源的电网常规故障计算方法主要采

用叠加定理法, 首先建立节点阻抗矩阵, 然后分别计算正常分量和故障分量, 进而得到叠加之后的计算结果。新能源高比例接入电网后, 其等效模型的电压与电流之间存在着非线性的关系, 因此需要通过迭代法<sup>[19-20]</sup>来求取准确的新能源故障电流。

考虑新能源接入的常规短路电流计算方法<sup>[10]</sup>在正常分量考虑了新能源电源注入的电流, 故障分量仅考虑故障电流, 通过节点电压方程求出各节点电压后, 更新新能源电源输出的故障电流, 再进行下一次迭代, 直至两次迭代的节点电压差小于规定值或迭代次数超过设定值, 结束迭代。

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{i,0}^{(k+1)} = \mathbf{Z} \mathbf{I}_{i,0}^{(k)} \\ \mathbf{U}_{i,0}^{(k+1)} = [\dot{U}_{1,0}^{(k+1)} \quad \dots \quad \dot{U}_{f,0}^{(k+1)} \quad \dots \quad \dot{U}_{n,0}^{(k+1)}]^T \\ \mathbf{I}_{i,0}^{(k)} = [\dot{I}_S^{(k)} \quad \dots \quad \dot{I}_{DG,j}^{(k)} \quad \dots \quad \dot{I}_{DG,l}^{(k)} \quad \dots]^T \\ \Delta \mathbf{U}_{i,0}^{(k+1)} = \mathbf{Z} \mathbf{I}_f^{(k+1)} \\ \Delta \mathbf{U}_{i,0}^{(k+1)} = [\Delta \dot{U}_1^{(k+1)} \quad \dots \quad \Delta \dot{U}_f^{(k+1)} \quad \dots \quad \Delta \dot{U}_n^{(k+1)}]^T \\ \mathbf{I}_f^{(k+1)} = [0 \quad \dots \quad -\dot{I}_f^{k+1} \quad \dots \quad 0]^T \end{cases} \quad (4)$$

式中: 上标“ $k$ ”为迭代次数;  $n$ 为网络中含有的节点数;  $\mathbf{U}_{i,0}$ 、 $\mathbf{I}_{i,0}$ 分别为正常网络的电压、电流向量;  $\Delta \mathbf{U}_{i,0}$ 、 $\mathbf{I}_f$ 分别为故障网络的电压、电流向量;  $\dot{I}_S$ 为同步发电机注入的电流;  $\dot{I}_f$ 为故障后短路电流;  $\dot{U}_{f,0}$ 为故障点电压;  $\mathbf{Z}$ 为网络的节点阻抗矩阵。

故障电流和故障后各节点电压  $\dot{U}_i$  的计算公式为

$$\dot{I}_f = \frac{\dot{U}_{f,0}}{\mathbf{Z}_{ff} + z_f} \quad (5)$$

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{i,0} + \Delta \dot{U}_i \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{Z}_{ff}$ 为故障点  $f$  的自阻抗;  $z_f$ 为过渡电阻。

上述方法在小规模系统中可以保证收敛性, 但是当电网节点数量增多, 新能源高比例接入后, 往往存在着收敛性变差和计算速度慢的问题。文献[16]将传统短路电流计算抽象为非线性方程组求解中的不动点迭代数学模型。由于大量新能源的等效模型引入了更多的非线性方程, 针对高比例新能源接入电网后故障电气量的求解, 不动点迭代已难以满足性能需求, 亟需研究兼具计算速度与收敛性的故障电流迭代计算方法。

### 2.2 基于牛顿类迭代算法的故障计算方法

#### 2.2.1 基于牛顿法的故障计算方法

高比例新能源接入电网的短路电流计算可以转化为非线性方程组的求解。牛顿法在迭代求解过程中具有二阶收敛性, 因此得到广泛应用<sup>[21]</sup>。

以一个节点数为  $n$ 、接入  $m$  台新能源的电网为例进行分析。由于新能源电源的短路电流与机端电

压之间的非线性耦合关系, 此时的节点电压方程为一个非线性方程。

$$Y\dot{U} = \dot{I} = F(\dot{U}) \quad (7)$$

式中:  $Y$  为网络节点导纳矩阵;  $\dot{U}$  为节点电压向量,  $\dot{U} = e + jf$ ;  $\dot{I}$  为节点注入电流向量;  $F$  为与电压有关的函数。

给定各节点电压  $[e^{(k)}, f^{(k)}]^T$ , 分别列写方程(7)的实部与虚部<sup>[16]</sup>, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} F_{i(R)} = \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - \dot{I}_{i(R)} \\ F_{i(I)} = \sum_{j=1}^n (B_{ij}e_j + G_{ij}f_j) - \dot{I}_{i(I)} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $F_{i(R)}$ 、 $F_{i(I)}$  分别为实部、虚部方程;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  分别为网络节点导纳矩阵中元素的实部、虚部;  $e_j$ 、 $f_j$  分别为  $j$  节点电压的实部、虚部,  $j=1, 2, \dots, n$ ;  $\dot{I}_{i(R)}$ 、 $\dot{I}_{i(I)}$  分别为网络中  $i$  节点同步发电机或新能源电源注入电流的实部、虚部,  $i=1, 2, \dots, n$ 。

最终得到非线性方程组如式(9)所示。

$$F([e, f]^T) = 0 \quad (9)$$

建立电网结构雅可比矩阵  $J_G$ , 如式(10)所示。

$$J_G = \begin{bmatrix} G & -B \\ B & G \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $G$ 、 $B$  分别为网络节点导纳矩阵中元素的实部、虚部向量。

新能源电源雅可比矩阵  $J_N$  为

$$J_N = \begin{bmatrix} H & N \\ R & S \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: 系数矩阵  $H$ 、 $N$ 、 $R$ 、 $S$  内部元素的具体表达式如附录 A 中式(A1)、式(A2)所示。

将新能源电源的雅可比矩阵与电网结构的雅可比矩阵相加, 最终得到电力系统的雅可比矩阵  $J$ , 如式(12)所示。

$$J = \begin{bmatrix} H+G & N-B \\ R+B & S+G \end{bmatrix} \quad (12)$$

基于牛顿法迭代的修正方程式<sup>[22]</sup>为

$$F([e^{(k)}, f^{(k)}]^T) = J^{(k)} \times ([\Delta e^{(k)}, \Delta f^{(k)}]^T) \quad (13)$$

式中:  $\Delta e$ 、 $\Delta f$  为电压波动量的实部和虚部。

由式(13)可得修正量为

$$[\Delta e^{(k)}, \Delta f^{(k)}]^T = (J^{(k)})^{-1} F([e^{(k)}, f^{(k)}]^T) \quad (14)$$

对各个状态量进行修正, 如式(15)所示。

$$[e^{(k+1)}, f^{(k+1)}]^T = [e^{(k)}, f^{(k)}]^T + [\Delta e^{(k)}, \Delta f^{(k)}]^T \quad (15)$$

设  $\varepsilon$  为迭代收敛误差, 若计算出的修正量

$\|[\Delta e^{(k)}, \Delta f^{(k)}]^T\|_{\infty} \geq \varepsilon$ , 继续进行迭代, 令迭代次数  $k = k + 1$ , 更新电压的实部和虚部为  $[e^{(k+1)}, f^{(k+1)}]^T$ , 采用新的电压值重新计算雅可比矩阵, 重复以上步骤, 满足精度要求后输出故障电流、各节点和新能源电源的电压计算结果。

### 2.2.2 基于拟牛顿法的故障计算方法

牛顿法每次迭代需要更新雅可比矩阵并求逆, 使计算量增大, 在高比例新能源接入电网的短路电流计算中适用性不强。拟牛顿法用矩阵的递推关系代替牛顿法中的雅可比矩阵, 因此迭代过程中不再需要每步求取雅可比矩阵的逆, 每次迭代的计算时间减少, 但是收敛阶下降为超线性收敛<sup>[23]</sup>。

本文选取拟牛顿法中的逆 Broyden 秩 1 方法<sup>[12]</sup>, 此时系数矩阵  $B^{(k+1)}$  的具体公式为

$$B^{(k+1)} = B^{(k)} - \frac{(B^{(k)}y^{(k)} - s^{(k)})(s^{(k)})^T B^{(k)}}{(s^{(k)})^T B^{(k)}y^{(k)}} \quad (16)$$

式中: 系数  $s^{(k)} = [e^{(k+1)}, f^{(k+1)}]^T - [e^{(k)}, f^{(k)}]^T$ ;  $y^{(k)} = F([e^{(k+1)}, f^{(k+1)}]^T) - F([e^{(k)}, f^{(k)}]^T)$ 。更改后的非线性方程组求解方程变为

$$s^{(k)} = B^{(k+1)}y^{(k)} \quad (17)$$

短路电流计算时首先确定初始系数矩阵  $B^{(0)}$  的值, 计算式(9)的非线性方程组, 然后计算  $-B^{(k)}F([e^{(k)}, f^{(k)}]^T)$  和  $[e^{(k+1)}, f^{(k+1)}]^T = [e^{(k)}, f^{(k)}]^T - B^{(k)}F([e^{(k)}, f^{(k)}]^T)$  得到新的节点电压值之后代入新能源短路电流计算公式中, 更新输出电流, 然后重新计算式(9), 根据式(16)更新  $B^{(k+1)}$ , 进行迭代, 当  $\|s^{(k)}\|_{\infty} < \varepsilon$  或  $\|F([e^{(k)}, f^{(k)}]^T)\|_{\infty} < \varepsilon$  时, 迭代结束, 输出故障电流、各节点和新能源电源的电压计算结果。

基于拟牛顿法的故障计算方法每次迭代的计算时间减少, 但是相较于牛顿法收敛性下降, 迭代次数增加, 具体的算法性能对比结果如表 1 所示。不同算法的性能差异难以直接衡量, 因此需要建立能够综合评估不同算法收敛性和计算速度的判据, 从而选择性能更好的算法进行故障计算。

表 1 不同算法性能对比

Table 1 Comparison of performance of different algorithms

算法类型	收敛阶	迭代次数	单次迭代计算速度
不动点迭代法	线性收敛	多	慢
牛顿法	二阶收敛	最少	快
拟牛顿法	超线性收敛	少	最快

### 2.3 牛顿法与拟牛顿法的自适应选择判据

结合 2.2 节分析可知, 牛顿类算法存在计算速度与收敛性难以同时满足的问题。因此, 本文通过

建立不收敛预判据和效率判据, 对两种算法进行自适应选择, 在保证收敛性的同时提升计算速度, 以更好地适应当前电网的计算需求。

### 2.3.1 迭代算法的不收敛预判据

将式(7)变换为不动点迭代的数学模型形式。

$$U^{(k+1)} = \phi(U^{(k)}) \quad (18)$$

式中:  $\phi$  为迭代函数。

设迭代过程中式(18)收敛于解析解  $U^*$ , 则牛顿法的收敛性公式<sup>[24]</sup>为

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\|U_i^{(k+1)} - U_i^*\|_{\infty}}{\|U_i^{(k)} - U_i^*\|_{\infty}^{\alpha_N}} = \xi_N \quad (19)$$

式中:  $U_i^{(k)}$  为第  $k$  次迭代解;  $\alpha_N = 2$ , 表示二阶收敛;  $\xi_N$  为牛顿法的收敛常数。

牛顿法收敛性为二阶收敛, 但是拟牛顿法的收敛阶降为超线性收敛<sup>[24]</sup>, 即

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\|U_i^{(k+1)} - U_i^*\|_{\infty}}{\|U_i^{(k)} - U_i^*\|_{\infty}^{\alpha_B}} = \xi_B \quad (20)$$

式中:  $\alpha_B > 1$ , 表示超线性收敛;  $\xi_B$  为拟牛顿法的收敛常数。当新能源高比例接入电网后, 随着迭代次数的增加,  $\xi_B$  值会慢慢增大, 收敛性逐渐变差。当  $\xi_B > 1$  时, 迭代将难以收敛。

在实际短路电流计算中, 式(19)、式(20)中的解析解  $U_i^*$  无法提前得到, 为了方便计算,  $\xi_B$ 、 $\xi_N$  的估算公式为

$$\xi_B = \frac{\max_{1 \leq i \leq n} |U_i^{(k+1)} - U_i^{(k)}|}{\max_{1 \leq i \leq n} |U_i^{(k)} - U_i^{(k-1)}|} \quad (21)$$

$$\xi_N = \frac{\max_{1 \leq i \leq n} |U_i^{(k+1)} - U_i^{(k)}|}{\max_{1 \leq i \leq n} |U_i^{(k)} - U_i^{(k-1)}|^2} \quad (22)$$

每次迭代结束后计算  $\xi_B$  值, 考虑到  $\xi_B$  接近 1 的时候收敛已经较差, 设置不收敛预判据  $\xi_B > 0.9$ , 当满足不收敛预判据时, 下一次短路电流计算重新用牛顿法进行一次迭代。

### 2.3.2 迭代算法的效率判据

牛顿法的收敛阶为二阶收敛, 但是单次迭代计算量大, 拟牛顿法的收敛阶为超线性收敛, 但是单次迭代计算速度快。两种收敛算法如果收敛阶不同, 可以认为收敛阶高的算法收敛快, 但是不同迭代算法的计算总时间仅用收敛阶难以说明优劣。为了更好地衡量迭代算法的性能, 除了需要考虑收敛阶以外还要考虑每步迭代的计算时间, 好的迭代算法能

用最少时间求出满足精度要求的解<sup>[25]</sup>。因此定义效率判据, 使迭代可以在牛顿法和拟牛顿法之间自动选择, 在不同工况下选出效率更高的方法进行计算。

第  $k$  次迭代误差  $\varepsilon^{(k)}$  的估算公式<sup>[26]</sup>为

$$\varepsilon^{(k)} = \max_{1 \leq i \leq n} |U_i^{(k+1)} - U_i^{(k)}| \quad (23)$$

采用 1 次牛顿法迭代后, 误差为

$$\varepsilon^{(k+1)} = \xi_N (\varepsilon^{(k)})^2 \quad (24)$$

采用  $p$  次拟牛顿法迭代后, 误差为

$$\varepsilon^{(k+p)} = \xi_B^{(p)} \varepsilon^{(k)} \quad (25)$$

由于牛顿法的收敛性较高, 计算过程中迭代次数小于拟牛顿法的迭代次数, 假设执行  $p$  次拟牛顿法迭代后与执行 1 次牛顿法迭代达到相同的精度。

联立式(24)、式(25), 解得达到相同精度时拟牛顿法需要迭代的次数  $p$  为

$$p = \ln(\xi_N \varepsilon^{(k)}) / \ln(\xi_B) \quad (26)$$

将迭代次数与单次迭代计算时间相乘即得到总计算时间。当满足式(26)时, 说明  $p$  次拟牛顿法迭代比 1 次牛顿法迭代总计算时间长, 此时拟牛顿法相较于牛顿法效率降低。

$$pT_B > T_N \quad (27)$$

式中:  $T_N$ 、 $T_B$  分别为执行 1 次牛顿法迭代、拟牛顿法迭代的计算时间。

将式(26)代入式(27), 得到最终的效率判据为

$$\xi_B > \xi \quad (28)$$

式中:  $\xi = \exp[\ln(\xi_N \varepsilon^{(k)}) T_B / T_N]$ 。

引入的效率判据为兼顾收敛性和计算速度的综合判据, 可以较好地评价算法的计算效果。当采用拟牛顿法计算的效率低于牛顿法时, 进行算法的转换, 采用效率高的算法继续进行迭代。

## 2.4 基于牛顿法和拟牛顿法自适应结合的新能源接入电网后故障计算方法

综上, 本文所提故障计算方法将设定的电压初值及精度要求输入拟牛顿法迭代, 同时, 计算不收敛预判据和效率判据, 实现牛顿法和拟牛顿法的自适应转换, 当误差满足精度要求时, 得到节点电压和新能源电源电压的计算结果, 方法的具体步骤如下。

1) 形成电力系统的节点导纳矩阵, 电压初值设为 1, 设置误差精度。

2) 采用拟牛顿法即式(9)、式(16)和式(17)进行计算。

3) 计算  $\xi_B$  的值, 判断是否满足不收敛预判据和效率判据, 若满足, 采用牛顿法, 即式(9)一式(15)计算一次; 若不满足, 继续采用拟牛顿法进行迭代。

4) 判断是否满足精度要求, 若不满足, 重复步骤 2) 和步骤 3); 若满足, 结束迭代, 计算故障电流, 输出各节点和新能源电源的电压计算结果。

基于牛顿法和拟牛顿法自适应结合的高比例新能源接入电网故障计算方法的流程图如图 4 所示。

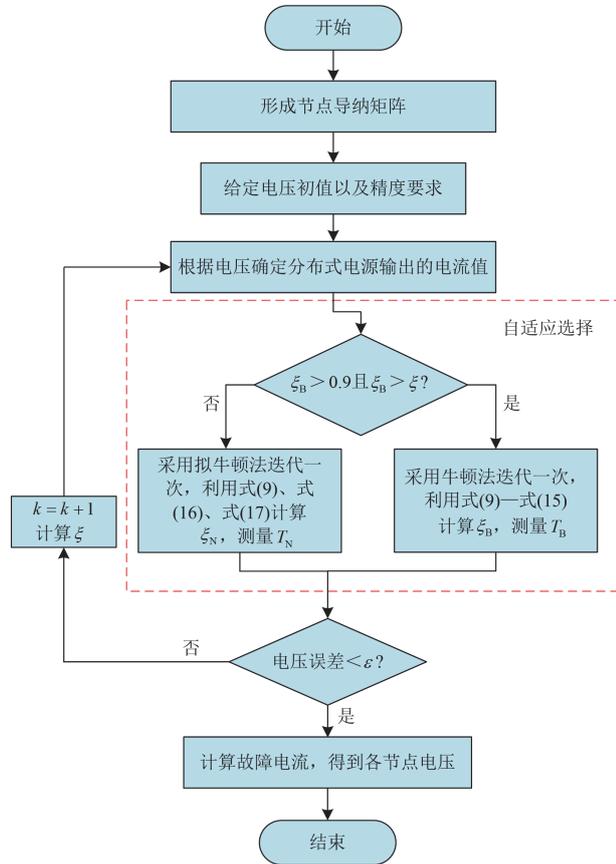


图 4 基于牛顿法和拟牛顿法自适应结合的高比例新能源接入电网故障计算方法流程图

Fig. 4 Flowchart of fault calculation method for high-proportion renewable energy connected to the power grid based on adaptive combination of Newton method and quasi-Newton method

### 3 算例分析

为了验证本文所提方法的有效性, 在 Matlab 中分别编制了不动点迭代法、基于牛顿法和拟牛顿法自适应结合的高比例新能源接入电网故障计算方法相应的程序, 以含新能源的改进 IEEE33 节点电网为例, 系统电压为 12.66 kV, 基准容量为 10 MVA。在系统中加入 4 台逆变型新能源, 逆变型新能源分别接入节点 5、节点 20、节点 24、节点 28, 含新能源的改进 IEEE33 节点电网的拓扑结构如图 1 所示。在 12 节点处设置三相短路故障, 对比分析不同算法之间的精度与收敛性。

#### 3.1 算法准确性验证

为了验证算法的准确性, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了上述新能源接入的改进 IEEE33 节点算例详细模型, 采用相同的参数, 并设置新能源容量为 1 MW。将发生故障后仿真得到的节点电压值与不同算法计算得到的数值进行对比, 三相短路故障后典型节点的对比结果如表 2 所示。

表 2 12 节点三相短路故障后典型节点电压对比结果

Table 2 Comparison results of typical node voltages after

12-node three-phase short-circuit fault					
节点	PSCAD 仿真值/kV	不动点 迭代法/kV	误差 e <sub>1</sub> /%	本文 方法/kV	误差 e <sub>2</sub> /%
1	12.55	12.547	0.02	12.547	0.02
2	12.4	12.405	-0.04	12.405	-0.04
3	11.6	11.611	-0.09	11.611	-0.09
4	10.98	10.993	-0.12	10.993	-0.12
5	10.34	10.35	-0.10	10.35	-0.10
6	8.649	8.661	-0.14	8.661	-0.14
20	12.53	12.536	-0.05	12.536	-0.05
21	12.53	12.536	-0.05	12.536	-0.05
22	12.53	12.536	-0.05	12.536	-0.05
23	11.64	11.647	-0.06	11.647	-0.06
24	11.7	11.717	-0.15	11.717	-0.15
25	11.7	11.717	-0.15	11.717	-0.15

由表 2 可知, 基于牛顿法和拟牛顿法自适应结合的高比例新能源接入电网故障计算方法, 得到的故障后节点电压与传统短路电流计算结果几乎相同, 与仿真结果的误差均在 0.2% 以内, 验证了本文所提故障计算方法具有较高的准确性。

#### 3.2 算法收敛性与计算速度验证

进一步比较不同算法在不同迭代收敛误差、不同新能源接入容量下的收敛情况, 并对计算时间的差异进行比较。

##### 1) 不同迭代收敛误差

设置不同的收敛误差, 比较两种算法的迭代次数, 结果如图 5 所示。随着迭代收敛误差的精度要求增高, 不动点迭代方法的迭代次数不断增加, 而基于牛顿法和拟牛顿法自适应结合的方法受影响较小, 迭代次数增加明显较缓。

##### 2) 不同新能源接入容量占比

设置不同的单台新能源电源的接入容量, 改变新能源接入容量在系统总发电容量中的占比, 设置新能源占比从 40% 到 70%, 比较两种算法的迭代次数, 结果如图 6 所示。随着新能源电源的接入容量占比增大, 不动点迭代方法的迭代次数不断增加, 而基于牛顿法和拟牛顿法自适应结合的方法仍然能够保持良好的收敛性。

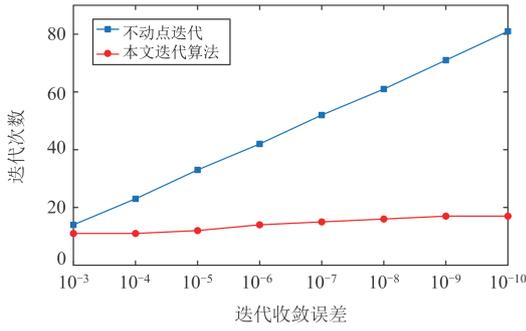


图5 不同迭代收敛误差时算法收敛性对比

Fig. 5 Comparison of algorithm convergence under different iterative convergence errors

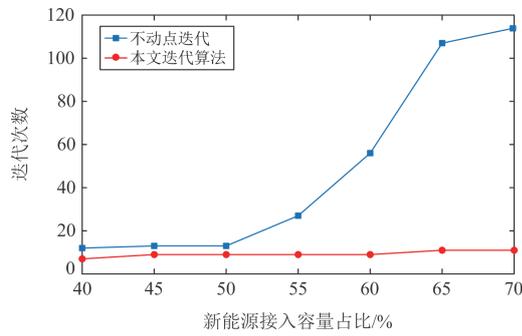


图6 不同新能源接入容量占比时算法收敛性对比

Fig. 6 Comparison of algorithm convergence under different proportion of renewable energy access capacity

### 3) 计算时间

设置不同的迭代次数, 比较两种算法在电网中的计算时间, 结果如图7所示。相比于不动点迭代方法, 基于牛顿法和拟牛顿法自适应结合的方法拥有更快的计算速度。

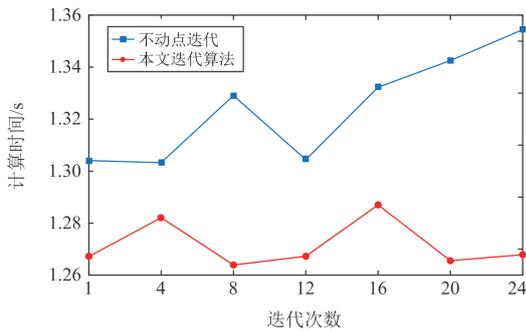


图7 IEEE33 节点电网中本文算法与不动点迭代计算时间对比情况

Fig. 7 Comparison of computation time between proposed algorithm and fixed point iteration in an IEEE33-bus power grid

综上, 基于牛顿法和拟牛顿法自适应结合的高比例新能源接入电网故障计算方法, 将具有二阶收

敛的牛顿法与计算高效的拟牛顿法结合起来, 可以在保证收敛性的前提下更快地完成故障电流和节点电压的求解, 在不同迭代收敛误差、不同新能源接入容量下收敛效果优于传统的不动点迭代法, 而且迭代的计算时间也更短。对于不同的工况具有良好的适应性, 可以满足高比例新能源接入电网后的短路电流计算需求。

## 4 结论

针对传统短路电流计算方法在高比例新能源场景下收敛性和计算速度难以满足的问题, 本文建立了逆变型新能源的稳态短路电流计算模型, 并在此基础上提出了一种基于牛顿法和拟牛顿法自适应结合的高比例新能源接入电网故障计算方法, 并得到以下结论。

1) 牛顿法的收敛阶为二阶收敛, 但是单次迭代计算量大, 拟牛顿法的收敛阶下降为超线性收敛, 但是单次迭代计算速度较牛顿法快, 两种算法各有优缺点。

2) 通过构建不收敛预判据和效率判据, 实现了对牛顿法和拟牛顿法的自适应选择, 在高比例新能源接入电网后仍能收敛, 且在保证计算精度的前提下提高了计算速度。

3) 本文仅考虑含逆变型新能源的电网, 随着高比例新能源接入电网, 针对含多种新能源类型的短路电流计算方法, 后续将开展进一步的研究工作。

## 附录 A

新能源电源雅可比矩阵中元素表达式为

$$\begin{cases} H_{(i,j)} = \frac{\partial I_{i(R)}}{\partial e_j} = -\frac{\partial I_{i,DG,d}}{\partial e_j} \cos(\theta_{j,U}) + I_{i,DG,d} \sin(\theta_{j,U}) \frac{\partial \theta_{j,U}}{\partial e_j} + \\ \frac{\partial I_{i,DG,q}}{\partial e_j} \sin(\theta_{j,U}) + I_{DG,q} \cos(\theta_{j,U}) \frac{\partial \theta_{j,U}}{\partial e_j} \\ N_{(i,n+j)} = \frac{\partial I_{i(R)}}{\partial f_j} = -\frac{\partial I_{i,DG,d}}{\partial f_j} \cos(\theta_{j,U}) + I_{i,DG,d} \sin(\theta_{j,U}) \frac{\partial \theta_{j,U}}{\partial f_j} + \\ \frac{\partial I_{i,DG,q}}{\partial f_j} \sin(\theta_{j,U}) + I_{i,DG,q} \cos(\theta_{j,U}) \frac{\partial \theta_{j,U}}{\partial f_j} \end{cases} \quad (A1)$$

$$\begin{cases} R_{(i+n,j)} = \frac{\partial I_{i(l)}}{\partial e_j} = -\frac{\partial I_{i,DG,d}}{\partial e_j} \sin(\theta_{j,U}) - I_{i,DG,d} \cos(\theta_{j,U}) \frac{\partial \theta_{j,U}}{\partial e_j} - \\ \frac{\partial I_{i,DG,q}}{\partial e_j} \cos(\theta_{j,U}) + I_{i,DG,q} \sin(\theta_{j,U}) \frac{\partial \theta_{j,U}}{\partial e_j} \\ S_{(i+n,j+n)} = \frac{\partial I_{i(l)}}{\partial f_j} = -\frac{\partial I_{i,DG,d}}{\partial f_j} \sin(\theta_{j,U}) - I_{i,DG,d} \cos(\theta_{j,U}) \frac{\partial \theta_{j,U}}{\partial f_j} - \\ \frac{\partial I_{i,DG,q}}{\partial f_j} \cos(\theta_{j,U}) + I_{i,DG,q} \sin(\theta_{j,U}) \frac{\partial \theta_{j,U}}{\partial f_j} \end{cases} \quad (A2)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_{j,U}}{\partial e_j} = -\frac{f_j}{e_j^2 + f_j^2} \\ \frac{\partial \theta_{j,U}}{\partial f_j} = \frac{e_j}{e_j^2 + f_j^2} \end{cases} \quad (\text{A3})$$

式中： $I_{i,DG,d}$ 、 $I_{i,DG,q}$  分别为  $i$  节点处光伏电源的有功电流、无功电流； $\theta_{j,U}$  为  $i$  节点处机端电压相位。

### 参考文献

- [1] 王增平, 林一峰, 王彤, 等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 10-20.  
WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 10-20.
- [2] WANG Zihao, MU Longhua. Microgrid fault detection method coordinated with a sequence component current-based fault control strategy[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(1): 81-93.
- [3] 冯海洋, 束洪春, 杨兴雄, 等. 计及阻容式撬棒的混合型风电场协同控制及故障特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 111-122.  
FENG Haiyang, SHU Hongchun, YANG Xingxiong, et al. Synergetic control and fault characteristics analysis of hybrid wind farm considering resistance-capacitance crowbar[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 111-122.
- [4] 韩伟, 刘素梅, 肖超, 等. 计及发电单元故障特性差异的光伏电站短路电流计算模型[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 129-135.  
HAN Wei, LIU Sumei, XIAO Chao, et al. Steady short-circuit calculation model for a photovoltaic station considering different generation units' fault characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 129-135.
- [5] OUYANG Jinxin, ZHENG Di, XIONG Xiaofu, et al. Short-circuit current of doubly fed induction generator under partial and asymmetrical voltage drop[J]. Renewable Energy, 2016, 88: 1-11.
- [6] 杨杉, 喻希, 罗朝旭, 等. 含换流器型分布式电源配电网的不对称短路电流计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 44-53.  
YANG Shan, YU Xi, LUO Zhaoxu, et al. Asymmetric short-circuit current calculation of a distribution network with inverter-based distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 44-53.
- [7] 王增平, 李菁, 郑涛, 等. 不同撬棒保护投入时刻下双馈风电机组短路电流计算分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 109-117.  
WANG Zengping, LI Jing, ZHENG Tao, et al. Calculation and analysis of three-phase short-circuit current of doubly fed wind turbines under different crowbar protection insertion times[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 109-117.
- [8] 尹项根, 张哲, 肖繁, 等. 分布式电源短路计算模型及电网故障计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 1-9.  
YIN Xianggen, ZHANG Zhe, XIAO Fan, et al. Study on short-circuit calculation model of distributed generators and fault analysis method of power system with distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 1-9.
- [9] SHI Xiaohan, ZHANG Hengxu, WEI Chuanzi, et al. Fault modeling of IIDG considering inverter's detailed characteristics[J]. IEEE Access, 2020, 8: 183401-183410.
- [10] 杨杉, 同向前, 刘健, 等. 含分布式电源配电网的短路电流计算方法研究[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1977-1982.  
YANG Shan, TONG Xiangqian, LIU Jian, et al. Short-circuit current calculation of distribution network with distributed generation[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1977-1982.
- [11] 吴成国, 肖仕武, 朱健. 含负序电压支撑分布式电源的电网分区短路电流计算方法[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 1159-1168.  
WU Chengguo, XIAO Shiwu, ZHU Jian. Calculation of power grid partition short-circuit current with negative sequence voltage-supported distributed generation[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1159-1168.
- [12] 郑心怡, 朱佳, 李银红. 提高含新能源交流电网短路计算迭代收敛性的改进方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(8): 201-209.  
ZHENG Xinyi, ZHU Jia, LI Yinhong. Improved method for improving iterative convergence of short circuit calculation in new energy AC power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(8): 201-209.
- [13] HE Jin, LI Zhixuan, LI Weixi, et al. Fast short-circuit current calculation of unbalanced distribution networks with inverter-interfaced distributed generators[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 146.
- [14] LI Jie, BI Haoran, LI Chengxin, et al. Analysis and calculation method for multiple faults in low-resistance grounded systems with inverter-interfaced distributed generators based on a PQ control strategy[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 138.
- [15] DU Bowen, GUO Haiyi, JIANG Tong. Two-stage short circuit current method based on new energy source fault

- characteristic fitting[C]//2023 2nd International Conference on Power System and Power Engineering, March 17-19, 2023, Nanchang, China: 1-12.
- [16] 吴成国, 肖仕武. 高比例分布式电源接入电网短路电流的拟牛顿迭代计算方法[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4581-4591.  
WU Chengguo, XIAO Shiwu. Quasi-Newton iterative calculation method for short circuit current of high proportion distributed generation connected to power grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4581-4591.
- [17] 郎学毅, 汤亚芳, 熊炜, 等. 适用于逆变型风电接入系统的改进故障序分量选相方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 89-97.  
LANG Xueyi, TANG Yafang, XIONG Wei, et al. An improved fault sequence component phase selection method adapted to an inverter-interfaced wind farm access system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 89-97.
- [18] 贾科, 侯来运, 毕天姝, 等. 基于故障区域局部迭代的工程实用化新能源短路电流计算[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13): 151-158.  
JIA Ke, HOU Laiyun, BI Tianshu, et al. Practical engineering calculation of short-circuit current for renewable energy based on local iteration of fault area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 151-158.
- [19] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 555-561.  
PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 555-561.
- [20] 周念成, 叶玲, 王强钢, 等. 含负序电流注入的逆变型分布式电源电网不对称短路计算[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 41-49.  
ZHOU Niancheng, YE Ling, WANG Qianggang, et al. Asymmetric short-circuit current calculation for inverter interfaced distributed generators with negative sequence current injection integrated in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 41-49.
- [21] 宋晓喆, 魏国, 李雪, 等. 基于预处理 BICGSTAB 法的电力系统潮流并行计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 18-28.  
SONG Xiaozhe, WEI Guo, LI Xue, et al. Parallel power flow computing in power grids based on a preconditioned BICGSTAB method[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 18-28.
- [22] 方万良, 李建华, 王建学, 等. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [23] 王建, 陈颖, 沈沉. 基于逆 Broyden 拟牛顿法的分布式暂态稳定仿真算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 7-12.  
WANG Jian, CHEN Ying, SHEN Chen. A distributed dynamic simulation algorithm for power systems based on inverse Broyden quasi Newton method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 7-12.
- [24] 李庆扬, 莫夜中, 祁力群. 非线性方程组的数值解法[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [25] 刘团结, 韦延方, 王鹏, 等. 适用于柔性直流系统潮流计算的高阶牛顿法效率分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3837-3848.  
LIU Tuanjie, WEI Yanfang, WANG Peng, et al. Efficiency analysis of high-order Newton method for flexible DC power flow calculation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3837-3848.
- [26] 江涵, 江全元. 一种可变步长的暂态稳定自适应修正牛顿组合算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 105-112.  
JIANG Han, JIANG Quanyuan. Power system transient stability simulation based on Shamanskii-VDHN algorithm with variable step size[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 105-112.

收稿日期: 2024-07-14; 修回日期: 2024-12-14

作者简介:

郑涛(1975—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: zhengtao@ncepu.edu.cn

曲荣淇(2000—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: qrongq2000@163.com

(编辑 周金梅)