

新能源

基于电压迭代的直驱风电场短路电流计算方法

骆尧涵^{1,3}, 汤皓环^{2,3}, 李金裕³, 侯山^{3,4}, 薛安成³

- 国网江苏省电力有限公司宜兴市供电分公司, 江苏 无锡 214200;
- 广东电网有限责任公司广州供电局, 广州 510620;
- 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;
- 国网河北省电力有限公司石家庄供电分公司, 石家庄 050051)

摘要: 风电场短路电流计算普遍采用等值模型, 不计内部线路、变压器等因素, 精度欠佳; 而考虑上述因素的短路电流计算方法多采用电压电流同时迭代的方式, 其收敛性难以直观验证。为此, 提出了一种计及风电场内部结构参数的短路电流算法。首先, 结合限幅作用下的 D-PMSG(永磁直驱风电机组) 电流特性与最大维度的风电场节点电压方程, 构建了风电场短路电流计算模型; 其次, 利用诺顿等值消去未知电流参数, 并结合工况变化确定修正的节点电压方程; 最后, 结合电压迭代, 得出了基于修正模型和风电场特性的短路电流计算方法。仿真对比结果表明, 所提方法具有较高的准确性以及更好的收敛性。

关键词: 大规模风电场; 短路电流; 永磁直驱风电机组; 迭代计算; 限幅作用

DOI: 10.19585/j.zjdl.202410008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A short-circuit current calculation method for direct-driven wind farms based on voltage iteration

LUO Yaohan^{1,3}, TANG Haohuan^{2,3}, LI Jinyu³, HOU Shan^{3,4}, XUE Ancheng³

- Yixing Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214200, China;
- Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China;
- State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China;
- Shijiazhuang Power Supply Branch of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Short-circuit current calculations for wind farms typically employ equivalent models that neglect internal lines, transformers, and other critical factors, leading to reduced accuracy. Methods that account for these factors often rely on simultaneous voltage and current iteration, which complicates the intuitive verification of convergence. To address such issues, this paper proposes a short-circuit current calculation method that incorporates the internal structural parameters of wind farms. Based on the current characteristics of direct-driven permanent magnet synchronous generators (D-PMSG) under current-limiting conditions and the equations for the maximum node voltage of wind farm, a calculation model for short-circuit current in a wind farm is built. Then, Norton equivalence is applied to eliminate unknown current parameters, and the modified node voltage equation based on varying operating conditions is established. Finally, by implementing voltage iteration, a modified short-circuit current calculation method based on the modified model and the characteristics of the wind farm is obtained. Simulation comparisons demonstrate that the proposed method offers enhanced accuracy and improved convergence.

Keywords: large-scale wind farm; short-circuit current; D-PMSG; iterative calculation; limiting effect

0 引言

相较2022年,我国在2023年新增海上风电装机量为604万kW,预计在2024年,我国海上风电新增装机量将超过1000万kW,其中,广东、山东、浙江、福建的海上风电新增装机量将排名前列,辽宁、广西建设节奏增快,海上风电大基地建设逐步成形^[1-2]。随着风电装机容量的不断提高,风电场对电网造成的影响也越来越明显。现有风电场短路电流分析方法可分为基于等值模型与详细模型的两类。受大规模风电场集电线路长、风机出力大等特点影响,大规模风电场的短路电流对自身及电网的影响难以量化分析^[3-6],目前风电场内保护设备多采用模糊处理集电线路参数、风机出力等因素的等值法^[7-10]的计算结果作为整定依据,其整体计算精准度偏低。

为解决精准度问题,不少文献考虑到风电机组并网规程^[11]和短路电流暂态特性^[12-13],将风电场内部拓扑与风电机组低电压穿越模型纳入计算,迭代求解风电场短路电流。现有迭代求解方法可大致分为电压电流相互迭代^[14-22]与电压迭代^[23-26]两类。

基于电压电流相互迭代,文献[14]针对数个逆变型电源接入配电网后发生的不同位置故障进行求解,并将结果作为划分区域的依据。文献[15]针对新能源接入电网后发生的不同位置故障进行迭代收敛性分析,并针对3种不同工况给出改进方法。文献[16]验证了相互迭代法在混合型风电场短路电流计算中的准确性。文献[17]则在不对称故障中进一步探究迭代方法的有效性。考虑到大型网络全局迭代速度偏慢,文献[18]提出了局部迭代的方法,将电网划分为数个不同故障程度的区域,以满足工程计算需要。文献[19]将整个系统划分为主电网与多个含新能源电源的子区域,通过增加迭代方程个数以减少迭代方程维度。文献[20]则利用拟牛顿迭代算法计算高比例分布式电源接入下的短路电流。采用电压电流相互迭代的电网模型整体的计算精度良好,但是对于大规模风电场接入,该方法所含变量偏多,计算耗时过长。

基于电压迭代,文献[21]将并网点电压等值

为恒定电流源,并将节点电压方程与电流方程进行整合,以电压为迭代变量进行计算。文献[22]进一步验证在不对称故障下电压迭代方法的准确性。然而上述文章并未考虑各机组工况与集电线路阻抗等风电场内部参数对收敛性与计算结果的影响。

针对上述问题,本文提出了一种计及内部拓扑的大规模直驱风电场短路电流迭代算法。首先,结合限幅作用下的D-PMSG(永磁直驱风电机组)输出特性与风电场节点电压方程,搭建了风电场短路电流模型;其次,利用诺顿等值法消去模型中的电流参数,并根据工况变化修正了节点电压方程;最后,通过电压迭代的方式,推导了基于修正模型和风电场特性的短路电流计算方法。并在不同规模风电场算例下进行计算,其计算结果与软件仿真结果对比表明,在系统故障期间,本文方法的计算精度满足风电场短路电流计算要求,且在风电场采用大容量机组时,本文方法相较于电压电流迭代具有更好的收敛性。

1 风电场短路电流迭代计算数学模型

1.1 考虑限幅的直驱风机输出电流

在并网运行中,D-PMSG网侧变流器一般采用无功控制优先策略^[27],该控制策略可向电网注入无功电流以抑制并网点电压跌落,其无功电流分量目标值的表达式为:

$$I_{qref} = \begin{cases} 0, U_i < 0.2 \\ K \times (0.9 - U_i) \times I_N, 0.2 \leq U_i < 0.9 \\ 0, 0.9 \leq U_i < 1.0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_{qref} 为无功电流分量参考值; K 为风电场动态无功比例,其取值范围^[23]应不小于1.5宜不大于3.0; I_N 为风机额定电流; U_i 为机端电压模值。

为防止电流过载,考虑设置网侧变流器电流限幅 I_{max} ,其大小在额定电流的1.1~1.5倍之间。在已知无功电流的基础上,可推得机组有功电流分量目标值 I_{dref} 如式(2)所示:

$$I_{dref} = \begin{cases} P/U_i, I_{dref} \leq I_{dref,max} \\ (\sqrt{I_{max}^2 - I_{qref}^2}, I_{dref} > I_{dref,max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P 为D-PMSG正常工况下输出的有功功率标么值。

联立式(1)和式(2),可得低电压穿越下D-

PMSG 机端电压 U_t 与有功电流 I_{dref} 、无功电流 I_{qref} 以及输出电流 I_t 之间的关系可用 $I_t = D_{PMSG}(U_t)$ 表示:

$$\begin{cases} I_{qref} = \max(-1.5 \times (0.9 - U_t), -I_{max}) \\ I_{dref} = \min(P/U_t, \sqrt{I_{max}^2 - I_{qref}^2}) \\ I_t = \sqrt{I_{dref}^2 + I_{qref}^2} \\ \theta_t = \arctan\left(\frac{I_{qref}}{I_{dref}}\right) \\ \dot{I}_t = I_t \angle (\psi_t + \theta_t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: ψ_t 为机端电压的相位角; θ_t 为输出电流超前电压相位角。

基于上述模型可画出 D-PMSG 并网点电压与输出电流的特性曲线, 如图 1 所示。其中, U_{lim} 为取到单台 D-PMSG 电流限幅的最大并网点电压, 其大小受风电机组出力影响, 出力越小越接近 0.2 p.u.; I_0 为当电压处于额定电压时风机的输出电流。值得注意的是, 风机出力会影响 U_{lim} 的大小和在 $[U_{lim}, 1]$ 的曲线斜率。

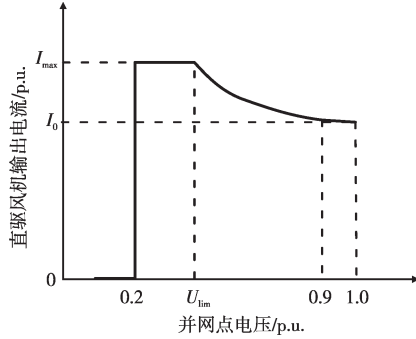


图 1 直驱风机电压-电流特性曲线

Fig.1 The voltage-current characteristic curves for the D-PMSG

1.2 风电场最大维度节点电压方程

本节基于风电场所含节点类型构建适用于大规模风电场的最大维度节点电压方程。

以图 2 中 m 台 D-PMSG 经数条集电线汇入电网的风电场为例, 将内部节点分为风机输入节点、风电场集电线节点与并网节点, $G_1 \sim G_m$ 为风机输入节点, $L_1 \sim L_{m+1}$ 为风电场集电线节点, pcc 为并网节点。

各节点电压与注入节点电流列向量如下:

$$U = [U_{G_1}, \dots, U_{G_m}, U_{L_1}, \dots, U_{L_{m+1}}, U_{pcc}]^T \quad (4)$$

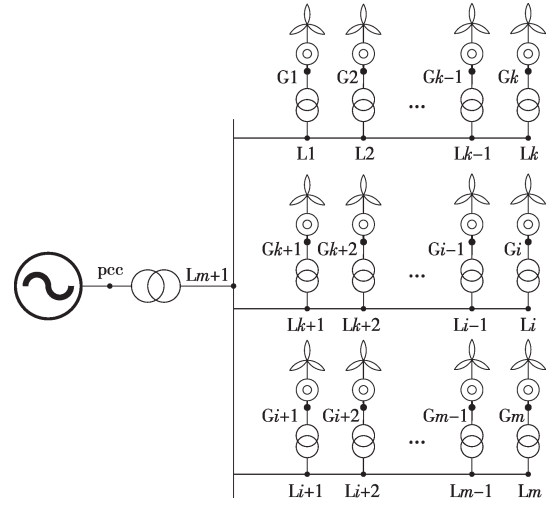


图 2 标注风机的风电场示意图

Fig.2 A windfarm with labelled wind turbines

$$I = [I_{G_1}, \dots, I_{G_m}, I_{L_1}, \dots, I_{L_{m+1}}, I_{pcc}]^T \quad (5)$$

由于风电场集电线节点不直接与风电机组相连, 导致电流列向量中对应元素为零:

$$I = [I_{G_1}, \dots, I_{G_m}, 0, \dots, 0, I_{pcc}]^T \quad (6)$$

结合节点电压、电流列向量于风电场内部结构, 可得如式(7)所示的节点电压方程为:

$$\begin{bmatrix} I_G \\ 0 \\ I_{pcc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} & 0 \\ Y_{LG} & Y_{LL} & Y_{L-pcc} \\ 0 & Y_{pcc-L} & y_{pcc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_G \\ U_L \\ U_{pcc} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: Y_{GG} 为风机输入节点间的导纳矩阵; Y_{LL} 为风电场集电线节点间的导纳矩阵; Y_{GL} 与 Y_{LG} 为风机输入节点与风电场集电线节点间的互导纳阵; y_{pcc} 为并网节点的自导纳, 其大小为升压主变导纳及系统等值导纳之和; Y_{L-pcc} 与 Y_{pcc-L} 为风电场集电线节点与并网节点间的互导纳矩阵, 且有如下关系:

$$Y_{L-pcc} = Y_{pcc-L}^T = [0 \ \dots \ 0 \ -y_{pcc}]^T \quad (8)$$

在各风电机组均处于工作状态时, 上述风电场节点电压方程维度将取到最大值, 本文将将其称为“最大维度节点电压方程”。在工况变化导致风机投切时, 可在该最大维度方程上修改, 无需重复获取节点电压方程。

1.3 短路电流计算联立模型

将如式(3)所示的每台风机的电流电压公式联立, 形成如式(9)的风电场内风机输入节点的短路电流列向量。随后联立式(9)与式(7), 将风机输出电流模型与最大维度节点电压方程结合, 可得风电场内输入节点的短路电流计算模型。

$$I_G = \begin{bmatrix} I_{G1} \\ I_{G2} \\ \dots \\ I_{Gn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{\text{PMSG}}(U_{G1}) \\ D_{\text{PMSG}}(U_{G2}) \\ \dots \\ D_{\text{PMSG}}(U_{Gn}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中： $I_{Gi} = D_{\text{PMSG}}(U_{Gi})$ 为第*i*台风机的机端电压与输出电流之间的关系。

值得注意的是，构建迭代方程过程中仍存在一些问題，如并网点输入电流 I_{pcc} 未知、节点电压方程随工况变化的修正方案待定等。

1.4 适用电压迭代的短路电流修正模型

在构造风电场短路电流迭代方程的过程中，为便于计算，考虑消去电流参数而将电压列向量作为迭代变量。因此，为构建适用电压迭代的短路电流模型，针对构建中存在的问题修正了短路电流计算联立模型，形成了如式(10)所示的适用电压迭代的风电场节点电压修正方程：

$$\begin{bmatrix} I_G \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{\text{GG}} & Y_{\text{GL}} \\ Y_{\text{LG}} & Y_{\text{LL}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_G \\ U_L \end{bmatrix} \quad (10)$$

2 基于修正模型求解的短路电流迭代计算

2.1 基于修正模型的电压迭代求解方程

在构造风电场短路电流迭代方程的过程中，为利于计算，将电压列向量作为迭代变量而消去电流参数。将风机的短路电流列向量代入式(10)，消去风机输出电流，进而得到式(11)。在已知并网点电压 U_{pcc} 的情况下，等号左侧为导纳矩阵乘以节点电压；公式等号右侧分为随迭代参数变化的列向量，以及不随迭代变量变化的常数 $y_{\text{pcc}}U_{\text{pcc}}$ 。

$$\begin{bmatrix} Y_{\text{GG}} & Y_{\text{GL}} \\ Y_{\text{LG}} & Y_{\text{LL}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_G \\ U_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{\text{PMSG}}(U_{G1}) \\ D_{\text{PMSG}}(U_{G2}) \\ \dots \\ D_{\text{PMSG}}(U_{Gn}) \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ y_{\text{pcc}}U_{\text{pcc}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

为构建迭代方程，对式(11)进行数学变换。首先，对等号左式中导纳矩阵进行分解，即 $Y = D + L + U$ ， D 为对角矩阵、 L 为对角线元素为0的上三角矩阵、 U 为对角线元素为0的下三角矩阵。其次，将等号右侧的风机电流特性函数在电压列向量 U_k 处线性化，过程如式(12)所示：

$$(L + D + U)U_x = \begin{bmatrix} J_f(U_{Gx}) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} U_x - \begin{bmatrix} J_f(U_{Gk}) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} U_k - I_k \quad (12)$$

$$\text{其中，} U_k = \begin{bmatrix} U_{Gk} \\ U_{Lk} \end{bmatrix}, U_x = \begin{bmatrix} U_{Gx} \\ U_{Lx} \end{bmatrix}, I_k = \begin{bmatrix} I_{Gk} \\ I_{Lk} \end{bmatrix}$$

式中： U_k 为未触及限幅区间的任意一点； U_x 为 U_k 附近某一电压向量； U_{Gk} 和 U_{Lk} 分别为向量 U_k 中风机节点部分和风电场集电线节点部分； U_{Gx} 和 U_{Lx} 分别为向量 U_x 中风机节点部分和风电场集电线节点部分； I_{Gk} 和 I_{Lk} 分别为在电压向量 U_k 下风机节点的输出电流相量与 $y_{\text{pcc}}U_{\text{pcc}}$ ； J_f 为输出电流曲线切线斜率矩阵，该矩阵为对角矩阵，对角线各元素为各台风机输出电流曲线在机端电压下的切线斜率； $J_f(U_{Gx})$ 和 $J_f(U_{Gk})$ 分别为风电机组机端电压列向量等于 U_{Gx} 和 U_{Gk} 时候的输出电流曲线切线斜率矩阵。

最后，将公式左侧的 L 、 U 矩阵移到等号右侧且等号两侧同时乘以矩阵 D^{-1} ，可获得类似 $x = Ax + b$ 形式的常规迭代方程。常规迭代方程如式(13)所示：

$$U_x = D^{-1} \left(\begin{bmatrix} J_f(U_{Gx}) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} - L - U \right) U_x - D^{-1} \left(\begin{bmatrix} J_f(U_{Gk}) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} U_k - I_k \right) \quad (13)$$

由式(13)可得，迭代方程收敛矩阵中包含分解导纳矩阵所得 LDU 矩阵以及输出电流曲线切线斜率矩阵 J_f ，其中 J_f 中各元素受机组电流曲线与集电网阻抗参数变化的影响。当机组额定容量变大或实际出力增大的情形下，触及限幅的临界电压 U_{lim} 与未触及限幅时机组电压-电流曲线的切线斜率将增大。上述情形使得迭代矩阵中的谱半径变大，进而导致整体收敛性变差。

因此，为保证迭代计算过程收敛^[28-29]，可利用数学方法对上式进行变换，构建如式(14)所示的改进迭代方程：

$$U_x = D'^{-1} \left(\begin{bmatrix} J_f(U_{Gx}) - J_f(U_{\text{lim}}) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} - L - U \right) U_x - D'^{-1} \left(\begin{bmatrix} J_f(U_{Gk}) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} U_k - I_k \right) \quad (14)$$

式中： $J_f(U_{\text{lim}})$ 为各风电机组机端电压等于 U_{lim} 时

候输出电流曲线切线斜率矩阵的解; D' 中内部元素如式(15)组合而成, 且为对角线矩阵:

$$D' = D - \begin{bmatrix} J_f(U_{lim}) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

由于风电机组存在限幅特性, 需要分别分析常规迭代方程与改进迭代方程在该特性下的收敛情况。本文分析了在限幅有无参与作用下的算法收敛性, 结果表明, 在电流限幅未作用下, 风机机端电压逐渐接近临界电压的过程中, 改进电压迭代方程收敛性将逐渐优于常规电压迭代方程; 在电流限幅作用下, 常规电压迭代方程收敛性比改进电压迭代方程更优秀。

2.2 风电场短路电流求解流程

大规模风电场短路电流求解流程如图 3 所示。

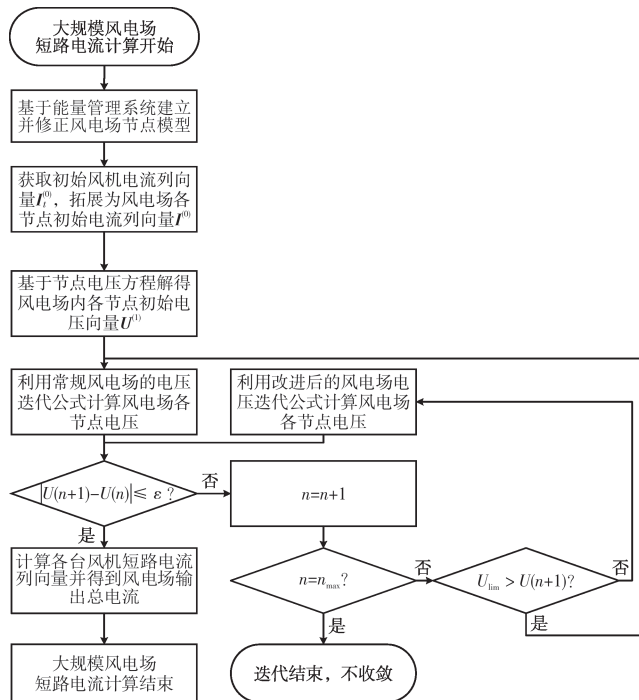


图 3 短路电流计算流程

Fig.3 Flowchart of short-circuit current calculation

具体计算步骤如下:

1) 输入风电场集电线参数、各直驱风机参数与出力, 设置初始风机电流列向量 $I_f^{(0)}$ 为各风机工作电流, 将其扩展为初始电流列向量 $I^{(0)}$ 。由节点电压方程求得风电场各节点电压列向量 $U^{(0)}$ 。

2) 设置迭代次数 $t=1$ 、迭代次数上限 t_{max} 与差值判据 ϵ 。

3) 根据电压迭代方程, 在第 n 次迭代中将列向

量 $U(n)$ 代入式(14)算得列向量 $U(n+1)$ 。

4) 随后进行收敛判断。若 $|U(n+1)-U(n)| \leq \epsilon$, 则认为此时风电场各节点的电压收敛, 并且同时满足判据要求, 退出迭代; 若 $|U(n+1)-U(n)| > \epsilon$, 则转到 5)。若迭代次数超过循环迭代次数上限, 则退出循环, 迭代次数+1。

5) 然后进行电压判断, 判断风电机组有无触及限幅。若 $U_{lim} < U(n)$ 则根据改进电压迭代方程计算得到电压列向量 $U(n+1)$, 之后转到 4); 若 $U_{lim} \geq U(n)$ 则转到 3)。

6) 获得风电场内各节点电压列向量 U 。

7) 根据风电机组输出电流特性获取各风机输出短路电流列向量, 计算得到风电场向电网输出的短路电流。

8) 结束计算流程。

3 仿真验证

本章在小规模风电场下以 PSCAD 仿真结果为标准验证本文方法的准确性; 然后以某大型风电场为算例, 比较本文方法与 BPA 详细模型和简化模型, 验证本文方法的准确性和适应性。仿真中基准功率取 100 MVA, 动态无功系数 K 取 1.5, 迭代上限设置为 50 次, 差值判据设置为 10^{-6} , 机端限幅 K_{lim} 取 1.2。

3.1 小规模风电场下的准确性验证

PSCAD 采用电磁暂态模型, 其仿真精度可保证, 而 BPA 采用机电暂态模型, 有一定简化。因此, 在小规模风电场, 以 PSCAD 结果作为标准结果, 比较本文方法和 BPA 计算结果。

对含 1 条集电线与 3 台额定电压 3 kV、额定功率 10 MW 直驱风电机组构成的风电场, 见图 4。集电线中每段线路阻抗为 $0.001 + j0.002$ p.u., 风机正常工作时出力 5 MW。箱变额定容量 11.4 MVA, 额定变比 36.75 kV/3.3 kV, 短路阻抗为 10.2%, 主变采用理想变压器, 额定变比为 230 kV/36.75 kV。三相故障设置在并网点与无穷大系统之间, 通过调整过渡电阻, 可改变风电场并网点压降, 进而获取在对应压降下风电场向系统输出的短路电流。

本文方法、BPA 直接计算结果与 PSCAD 结果对比如图 5 所示。图 5 表明, 本文方法所得结果总体小于 PSCAD 结果, 整体误差在 1.25% 以内;

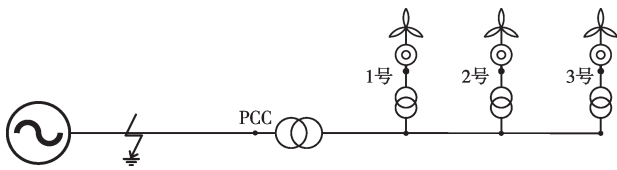


图 4 小规模风电场接线示意图

Fig.4 Wiring diagram of a small-scale wind farm

而BPA仿真结果也是总体小于PSCAD仿真,但整体误差达1.75%;当并网节点压降为0.3 p.u.时,本文方法、BPA结果较于PSCAD结果,误差均达到最大,分别1.21%与1.74%;因此,在不同故障下,相较于BPA仿真,本文方法计算精度更高。

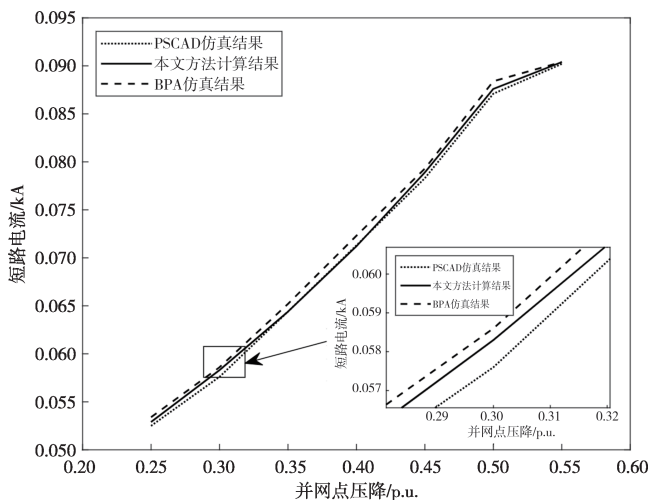


图 5 PSCAD、BPA 仿真结果与本文方法计算结果对比
Fig.5 Comparison of PSCAD and BPA simulation results with the calculated results from the proposed method

3.2 大规模风电场情形

3.2.1 仿真算例及其参数

以东南某大规模海上风电场为例,其风电场内部结构如图6所示。该风电场包含45台4 MW D-PMSG,每台风电机组的电流限幅为0.048 p.u.,其出口电压0.69 kV经变压器升至35 kV风电场电网,再经风电场内部的集电线送入220 kV电网。

仿真中,考虑在系统内部的不同位置发生三相短路,以获得PCC点压降不同的故障。风电场与系统间交流线路中流过的电流为风电场向系统输送的短路电流,其大小等于各台风电机组输出的短路电流相量之和。

风电场短路电流计算考虑如下3种方法:

1)BPA简化模型。在BPA中将不同风机等值

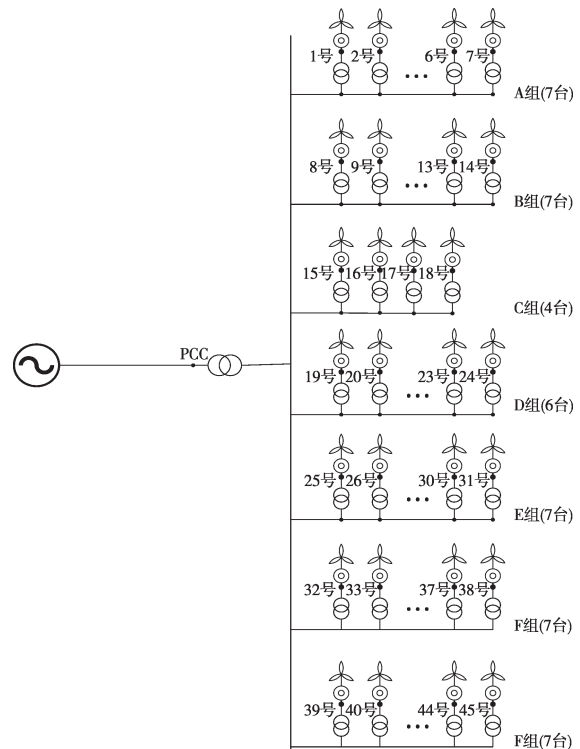


图 6 某风电场内部结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of the internal structure of a wind farm

为2台机组的等值简化模型。

2)BPA详细模型。在BPA中构建包含集电线路、D-PMSG与变压器的详细模型。

3)本文方法。

3.2.2 未触及电流限幅工况(相对轻微故障)

设置各机组出力均为1 MW,此时,当故障导致并网节点电压降至0.4~0.65 p.u.时,输出电流并未触及变流器限幅。此时,不同方法获得的短路电流结果如图7和表1所示。图7和表1表明,在不同压降下,简化模型与本文方法二者偏差保持在10%左右,压降为0.65 p.u.时,偏差达到最大,为11.72%;详细模型与本文方法二者偏差保持在5%以下,压降为0.65 p.u.时,偏差达到最大,为4.679%。上述结果表明,因未计及内部的集电线、风机变压器的影响,简化模型短路电流结果偏高;本文方法与BPA详细模型结果相当。

3.2.3 触及电流限幅工况(相对严重故障)

本节给出在触及电流限幅的相对严重故障下,不同方法的短路电流计算结果。

设置各机组出力均为2 MW,此时,当故障导致并网节点电压降至0.4~0.65 p.u.时,输出电流存

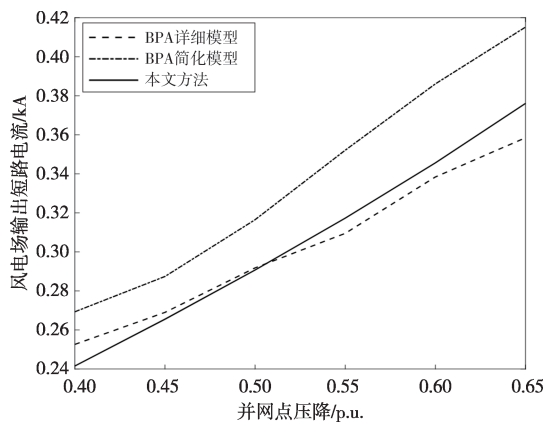


图 7 未触及限幅时 3 种方法结果对比

Fig.7 Comparison of results from three methods with the limit unreached

表 1 未触及限幅时各方法短路电流计算结果

Table 1 Results of short-circuit current calculation using the methods with the limit unreached

并网节点 压降/p.u.	本文方法 /p.u.	BPA 简化模型		BPA 详细模型	
		电流 /p.u.	偏差率 /%	电流 /p.u.	偏差率 /%
0.40	0.962 2	1.072 9	11.511	1.006 4	4.596
0.45	1.057 8	1.145 0	8.2480	1.071 7	1.318
0.50	1.158 2	1.260 9	8.8750	1.162 5	0.378
0.55	1.264 1	1.382 9	10.967	1.233 1	2.458
0.60	1.376 9	1.538 2	11.718	1.348 2	2.083
0.65	1.498 4	1.654 2	10.396	1.428 3	4.679

在触及变流器限幅的情况。此时,需关注电流幅值 I_{max} 与临界电压 U_{lim} 。

在不同并网节点压降下,3 种方法获得的短路电流见图 8 和表 2。图 8 和表 2 表明,各个压降下简化模型与本文方法二者偏差保持在 4% 以下,详细模型与本文方法二者偏差保持在 3% 以下,能够基本满足短路计算的准确性要求。

然而,图 8 和表 2 同时表明,不同方法下,对应的触及电流限幅大小与对应的压降存在不同。电流限幅方面,本文方法与详细模型中触及的电流限幅大小接近,简化模型方法则偏小;临界压降方面,本文方法与详细模型中压降达到 0.6 p.u. 时触及限幅,而简化模型方法压降达到 0.55 p.u. 时已经触及限幅。

上述分析表明,在大规模风电场场景下忽略线路、变压器等元件参数的简化模型会夸大短路

电流与临界电压,使得整体低电压穿越时期的控制策略偏保守,而详细模型的计算结果更接近本文方法计算结果,但是现实中难以完整获得风机的各类参数,使得计算精度难以得到保证。

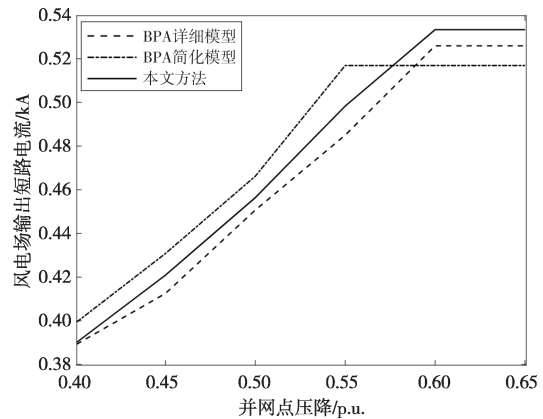


图 8 触及限幅时 3 种方法的短路电流对比

Fig.8 Comparison of short-circuit currents using the three methods with the limit reached

表 2 触及限幅时各方法仿真电流计算结果

Table 2 Results of short-circuit current calculation using the methods with the limit reached

并网节点 压降/p.u.	本文方法 /p.u.	BPA 简化模型		BPA 详细模型	
		电流/p.u.	偏差率/%	电流/p.u.	偏差率/%
0.40	1.552 6	1.589 5	2.386	1.549 7	1.550 2
0.45	1.676 9	1.716 2	2.352	1.643 3	1.643 4
0.50	1.818 3	1.857 2	2.147	1.795 5	1.795 6
0.55	1.977 3	2.059 2	3.732	1.963 2	1.932 3
0.60	2.124 7	2.059 2	3.075	2.095 0	2.095 2
0.65	2.124 7	2.059 2	3.075	2.095 0	2.095 2

3.2.4 收敛性比较

特别地,为比较常规电压电流迭代方法与本文方法的收敛能力,本文在 3.2.3 节算例的风电场拓扑结构基础上,分别再采用了 4 MW 与 8 MW 风电机组,计算各方法在不同压降下所需的迭代次数,其对比结果分别如表 3 和表 4 所示。两种情况中风机出力均为 50%。

表 3 和表 4 表明,在两种方法迭代都收敛时,本文方法所需迭代次数比电压电流迭代方法多。然而,表 4 结果表明,在风电场采用较大容量机组时,在临界电压附近,电压电流迭代方法存在不收敛现象。即,在临界电压下,风机额定容量为

表 3 4 MW 机组时本文方法与电压电流迭代方法对比

Table 3 Comparison of iteration times between the proposed method and voltage-current iteration method(4 MW units)

并网电压降 /p.u.	电压电流迭代 所需迭代次数/次	本文方法 所需迭代次数/次
0.40	28	54
0.45	27	72
0.50	23	45
0.55	22	38
0.60	21	30
0.65	19	23

表 4 8 MW 机组时本文方法与电压电流迭代方法对比

Table 4 Comparison of iteration times between the proposed method and voltage-current iteration method(8 MW units)

并网电压降 /p.u.	电压电流迭代 所需迭代次数/次	本文方法 所需迭代次数/次
0.40	27	86
0.45	60	239
0.50	不收敛	886
0.55	367	457
0.60	167	288
0.65	117	142

4 MW 时, 风电机组电压-电流曲线的切线斜率对收敛性的影响不大, 而在额定容量 8 MW 时, 风电机组电压-电流曲线的切线斜率对收敛性的影响较大。本文方法通过构造新的迭代, 提高了大功率机组临界电压时的收敛性, 具有一定优势。

4 结论

本文基于风电机组稳态模型与风电场节点电压方程, 提出了一种计及内部拓扑的大规模直驱风电场短路电流迭代算法, 得到以下结论:

1) 基于诺顿等值的电压迭代修正方程具有良好的局部收敛性。

2) 以 PSCAD 为基准, 与 BPA 仿真对比结果表明, 本文方法具有较高的准确性。

3) 在风电场采用大容量机组时, 本文方法相较于电压电流迭代方法, 具有更好的收敛性。

本文方法可应用于大规模风电场规划设计, 也可在测控电流丢失或者测量电流误差较大时提供相对准确的短路电流。

值得注意的是, 本文方法在其他系统中的准确性有待进一步验证。同时, 本文方法适用于单个并网点的风电场, 对于含有多个并网点的风电场, 还需进一步研究。

参考文献

- [1] 国家能源局. 新型电力系统发展蓝皮书[R]. 北京: 国家能源局, 2023.
- [2] 苏南. 我国海上风电新增装机重返“高速路”[N]. 中国能源报, 2023-12-25(17).
- [3] 令狐桐雯, 韩民晓, 霍启迪, 等. 考虑不同故障穿越模式的双馈风电场短路电流计算等值建模[J]. 南方电网技术, 2022, 16(10): 28-37.
LINGHU Tongwen, HAN Minxiao, HUO Qidi, et al. Equivalent modeling of doubly-fed wind farms short-circuit current calculation considering different fault ride-through modes[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(10): 28-37.
- [4] 韩璐, 李凤婷, 王春艳, 等. 风电接入对继电保护的影响综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 163-169.
HAN Lu, LI Fengting, WANG Chunyan, et al. A survey on impact of wind farm integration on relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 163-169.
- [5] 贾科, 李英, 孔嘉靖, 等. 风光电源故障暂态解析及实用化短路电流峰值计算[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 830-838.
JIA Ke, LI Ying, KONG Jiaping, et al. Fault dynamic behaviors analysis and practical peak short-circuit current calculation of wind and solar power sources[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 830-838.
- [6] 冯子木, 孙国强, 滕德红, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越研究综述[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 75-85.
FENG Zimu, SUN Guoqiang, TENG Dehong, et al. Reviews of LVRT technology for D-PMSG[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 75-85.
- [7] 齐金玲, 李卫星, 晁璞璞, 等. 直驱风电场实用化等值方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 50-57.
QI Jinling, LI Weixing, CHAO Pupu, et al. Practical equivalent method for direct-driven wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 50-57.
- [8] 贾科, 孔繁哲, 张旸, 等. 基于改进 K-均值算法的双馈风电场故障等值建模方法[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4161-4173.
JIA Ke, KONG Fanzhe, ZHANG Yang, et al. Fault equivalent modeling method of doubly fed wind farm based on improved K-means algorithm[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4161-4173.
- [9] 龚永智, 陶晔, 许传敏, 等. 考虑风电机组馈入电流的风电场汇集线路保护整定计算方法[J]. 电力系统保护与控制

- 制, 2020, 48(11): 128-135.
- GONG Yongzhi, TAO Ye, XU Chuanmin, et al. Relay protection setting calculation of wind farm collector lines considering wind turbine increased short-circuit current [J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(11): 128-135.
- [10] 徐玉琴, 刘丹丹. 基于两步分群法的双馈机组风电场等值建模[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(6): 108-114.
- XU Yuqin, LIU Dandan. Equivalence of wind farms with DFIG based on two-step clustering method [J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(6): 108-114.
- [11] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定 第 1 部分: 陆上风电: GB/T 19963.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [12] 王熙纯, 刘纯, 林伟芳, 等. 风机故障穿越特性对大规模风电直流外送系统暂态过电压的影响及参数优化[J]. *电网技术*, 2021, 45(12): 4612-4620.
- WANG Xichun, LIU Chun, LIN Weifang, et al. Influence of wind turbine fault ride-through characteristics on transient overvoltage of large-scale wind power DC transmission systems and parameter optimization [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(12): 4612-4620.
- [13] 孙大卫, 吴林林, 刘辉, 等. 弱电网直驱风机低电压穿越特性及其对机端暂态电压的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(14): 4777-4786.
- SUN Dawei, WU Linlin, LIU Hui, et al. Effect of the low voltage ride through characteristics on PMSG terminal transient voltage in weakly-synchronized grid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(14): 4777-4786.
- [14] 洪树斌, 范春菊, 陈实, 等. PQ 控制策略下多逆变器电源的故障等值方法[J]. *电网技术*, 2018, 42(4): 1101-1109.
- HONG Shubin, FAN Chunju, CHEN Shi, et al. Research on fault equivalence method for multiple inverter-interfaced distributed generation based on PQ control strategy [J]. *Power System Technology*, 2018, 42(4): 1101-1109.
- [15] 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/OL]. *电力自动化设备*, 2023: 1-12.
- ZHENG Xinyi, ZHU Jia, Li Yinghong, et al. Improved methods to improve the iterative convergence of short-circuit calculation in new energy AC power grids [J/OL]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023: 1-12.
- [16] 尹俊, 毕天姝, 薛安成, 等. 计及低穿控制的混合型风电场短路电流特性与故障分析方法研究[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(21): 99-110.
- YIN Jun, BI Tianshu, XUE Ancheng, et al. Study on short-circuit current and fault analysis method of hybrid wind farm with low voltage ride-through control strategy [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(21): 99-110.
- [17] 刘慧媛, 肖繁, 张哲, 等. 新能源电源接入不平衡配电网的短路计算方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(21): 177-186.
- LIU Huiyuan, XIAO Fan, ZHANG Zhe, et al. Short-circuit calculation method for unbalanced distribution network with integration of renewable energy [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(21): 177-186.
- [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] 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.
- [20] 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): 4581-4590.
- 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): 4581-4590.
- [21] 栗锐遥, 王潇, 贾辛遥, 等. 基于附加阻尼控制的 PMSG 适应柔直送出策略优化[J]. *电力建设*, 2023, 44(10): 127-136.
- LI Ruiyao, WANG Xiao, JIA Xinyao, et al. Strategy optimization of PMSG adapting to flexible DC transmission based on additional damping control [J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(10): 127-136.
- [22] 杨滢, 杨晓雷, 项中明, 等. 参与一次调频储能型风电场的交流外送振荡特性分析[J]. *智慧电力*, 2023, 51(9): 105-112.
- YANG Ying, YANG Xiaolei, XIANG Zhongming, et al. Oscillation characteristic analysis of wind farm with energy storage participating primary frequency control [J]. *Smart Power*, 2023, 51(9): 105-112.
- [23] 董张卓, 刘魁, 张倍倍. 含分布式电源配电网通用故障电流计算方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(18): 161-168.
- DONG Zhangzhuo, LIU Kui, ZHANG Beibei. A general fault current calculation method for distribution network with distributed generation [J]. *Power System Protection*

- and Control, 2019, 47(18):161-168.
- [24] 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.
- [25] 陈楚靓, 李晓露, 纪坤华, 等. 考虑源荷储匹配的配电网集群划分与优化运行[J]. 电力建设, 2023, 44(9):80-93.
CHEN ChuJing, LI Xiaolu, JI Kunhua, et al. Distribution network cluster partition and optimal operation considering source-load-storage matching [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9):80-93.
- [26] 夏正龙, 陆良帅, 吴启凡, 等. 改进灰狼算法在含风电的配电网无功优化中的应用[J]. 智慧电力, 2023, 51(6):63-70.
XIA Zhenglong, LU Liangshuai, WU Qifan, et al. Application of improved grey wolf in reactive power optimization of distribution networks with wind power integration [J]. Smart Power, 2023, 51(6):63-70.
- [27] 吴文传, 张伯明, 孙宏斌, 等. 主动配电网能量管理与分布式资源集群控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9):111-118.
WU Wenchuan, ZHANG Boming, SUN Hongbin, et al. Energy management and distributed energy resources cluster control for active distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9):111-118.
- [28] 程雪婷, 张家瑞, 刘新元, 等. 考虑风机排序的风电集群分层有功控制策略[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2):26-32.
CHENG Xueting, ZHANG Jiarui, LIU Xinyuan, et al. Hierarchical active control of wind power cluster considering ordered wind turbines [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2):26-32.
- [29] 邱启荣. 矩阵论与数值分析:理论及其工程应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2013.
-
- 收稿日期:** 2024-04-16; **修回日期:** 2024-06-26
- 作者简介:**
 骆尧涵(1999), 男, 硕士研究生, 主要从事新能源电力系统短路电流计算与抑制方面的研究工作。
 薛安成(1979), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事模型和数据驱动的新能源电力系统稳定性和安全防御、二次设备评估等研究工作。(通信作者)
- (本文编辑: 童 凯)