

基于分区线性化诺顿等值的高比例 新能源电力系统短路电流计算方法

任冲¹, 行舟¹, 程林¹, 孔贺¹, 崔明建²

(1. 国家电网有限公司西北分部, 西安市 710048; 2. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津市 300072)

摘要:【目的】随着新能源占比不断提升, 新能源提供的短路电流对系统运行方式安排及开关遮断容量校核影响逐渐增大, 目前高比例新能源电力系统短路电流计算面临传统计算方法精度不足、新能源模型参数获取困难等挑战。为准确评估新能源并网对系统短路电流特性的影响, 提出一种基于分区线性化诺顿等值的高比例新能源电力系统短路电流计算方法。【方法】首先, 基于典型低电压穿越控制逻辑, 建立了将新能源故障响应划分为外部区、影响区和核心区的实用化电压-电流映射模型, 该模型仅需要易获取的并网导则或设备规格参数。其次, 针对影响区的新能源单元, 推导了随端电压动态变化的线性化诺顿等值参数计算式, 克服了传统固定参数等值模型的局限性。然后, 为提高大规模系统计算效率, 提出了一种基于故障影响区域自适应划分的分区迭代计算策略, 将精细化的诺顿等值模型应用于故障核心及影响区域, 并与外部区域的简化模型协同求解。【结果】通过在改进3机9节点和IEEE 30节点系统上的仿真验证, 结果表明, 所提方法计算的节点电压和短路电流 MATLAB/Simulink 仿真结果高度吻合。【结论】所提方法能够在不依赖复杂内部控制参数的前提下, 准确刻画新能源在故障过程中的非线性、多阶段响应特性, 为高比例新能源电力系统的短路电流分析提供了有效工具。

关键词: 高比例新能源; 短路电流计算; 诺顿等值; 分区计算; 低电压穿越; 电压-电流映射

中图分类号: TM743

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2026)04-0122-10

DOI: 10. 12204/j. issn. 1000-7229. 2026. 04. 010

A Short-Circuit Current Calculation Method Based on Zonal Linearized Norton Equivalents for High Proportion Renewable Energy Power Systems

REN Chong¹, XING Zhou¹, CHENG Lin¹, KONG He¹, CUI Mingjian²

(1. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China; 2. School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

ABSTRACT: [Objective] With the continuous increase in the proportion of renewable energy, the impact of renewable energy on short-circuit current calculations and circuit-breaker interrupting capacity verification is becoming increasingly significant. Currently, short-circuit current calculations in high proportion renewable energy power system face challenges such as insufficient accuracy of traditional methods and difficulties in obtaining renewable energy model parameters. To accurately assess the impact of renewable energy integration on system short-circuit current characteristics, this article proposes a short-circuit current calculation method for high proportion renewable energy power system based on zonal linearized Norton equivalents. [Methods] Firstly, based on typical low voltage ride through control logic, a practical voltage-current mapping model is established, dividing the renewable energy fault response into a external zone, an influence zone, and a core zone. This model only requires easily accessible grid codes or equipment parameters. Secondly, for renewable energy units in the influence zone, formulas for calculating linearized Norton equivalent parameters that dynamically vary with terminal voltage are derived, overcoming the limitations of traditional fixed parameter equivalent models. Thirdly, to improve computational efficiency for large scale systems, an adaptive zonal partitioning and iterative calculation strategy is proposed. This strategy applies detailed Norton equivalent models to the fault core and influence zones while solving with simplified models for external zones. [Results] Simulation validations on a 3-machine 9-node system and an improved IEEE 30-node system demonstrate that the proposed method yields node voltages and short-circuit currents that highly match those from

MATLAB/Simulink simulations. [Conclusions] The proposed method accurately characterizes the nonlinear and multi-stage response characteristics of renewable energy during faults without relying on complex internal control parameters, providing an effective tool for short-circuit current analysis in high proportion renewable energy power system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52207130).

KEYWORDS: high proportion renewable energy; short-circuit current calculation; Norton equivalent; zonal calculation; low voltage ride through; voltage-current mapping

0 引言

风电、光伏快速发展改变了电网的传统物理特性与运行方式^[1-2]。其中,短路电流作为电力系统规划设计、继电保护配置及设备选型的核心依据,其计算的准确性直接关系到电网的安全稳定运行^[3-4]。传统电力系统以同步发电机为主导,其故障特性已得到了充分研究和精确建模。然而,新能源发电单元(如风电机组、光伏阵列)通过电力电子变流器并网,其故障响应行为与同步发电机存在本质区别,其具有快速的控制响应、故障电流限幅以及复杂的低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)控制策略^[5]。这些新特性使得传统短路电流计算方法在应用于高比例新能源电力系统时面临严峻挑战。已有研究指出,在新能源占比较高的实际电网中,采用传统方法计算的短路电流与实际值偏差较大^[6],为此,研究适用于新能源特性的短路电流计算工程方法具有重要意义。

针对新能源接入带来的短路电流计算难题,国内外学者开展了大量研究,主要可分为详细电磁暂态(electromagnetic transient, EMT)仿真和各类简化等效建模两大技术路径。EMT仿真软件能够通过精细模型准确复现电力电子装置的动态行为,对于小规模系统分析或特定设备验证具有不可替代的优势^[7-15]。例如,文献[6]基于变流器的输入-输出外特性等效变流器的数学模型,给出考虑控制策略的双馈风力发电机组故障期间暂态模型,分析低电压穿越控制策略对短路电流的影响机理,最终建立双馈风力发电机组短路电流计算的等效模型。但对于大规模交直流混联电网,EMT仿真的计算负担巨大,难以满足系统规划和计算效率的要求。更为关键的是,影响新能源短路电流的内部具体控制参数以及复杂模型难以获取,因为关键控制参数往往涉及设备制造商密^[16],极大限制了EMT模型在实际工程中的普适性。

因此,研究重点逐渐转向开发兼顾精度和实用性的新能源等效模型。早期研究尝试在短路电流计算国际标准 IEC 60909 框架下对新能源短路电流模型修正,将新能源视为故障期间的恒流源或简单压

控电流源,主要反映其限流和LVRT基本要求。例如,文献[17]将新能源机组等效为故障期间贡献1.0~1.5倍额定电流的电流源。但是,这种等效忽略了故障前新能源负荷电流,同时忽略了电压跌落较浅时新能源“因电压下降,有功电流增加”维持有功出力的具体机制。这些模型未能完全捕捉有功/无功优先控制策略的动态转换细节,以及故障前运行状态对故障电流的影响。与精细的电磁仿真计算相比,这些简化模型在精度、适用性之间进行了折中。

将新能源等效为戴维南或诺顿电路,是平衡计算效率与模型精度的另一重要途径^[18],这在稳定分析领域较为常见。文献[19]基于戴维南等值的思想,求解新能源并网的临界短路比;文献[20]将新能源等值为负的阻抗,进行暂态功角稳定性分析。然而,多数此类等值模型或基于单一工作区线性化,或难以全面刻画新能源在不同电压跌落深度下的多阶段控制逻辑转换,因此,难以直接应用于新能源电力系统的短路电流计算。本文借鉴此思路,进一步计及新能源在故障下响应的多种模式,根据端电压分为“外部区”(电压轻微跌落,维持有功)、“影响区”(LVRT激活,无功优先)和“核心区”(电压深度跌落,注入最大无功或总电流限幅由无功贡献)。现有等值方法对这种“分区域”特性的考虑尚不充分,缺乏能够准确反映多分段控制逻辑、参数易于获取且便于集成的通用等值模型。

进一步地,对于大规模系统,即便采用改进的新能源等值模型,全局迭代求解非线性方程组依然面临计算效率瓶颈。文献[21]针对现有短路电流计算方法在处理高比例分布式电源电网时的不足,提出了一种计及电网电压约束条件的分布式电源接入电网的新型迭代计算方法。文献[22]比较不同控制条件下多逆变器分布式电源短路电流和端电压响应,揭示分布式电源短路电流与电网以及自身不脱网运行持续时间的关系,提出计及不脱网运行时序和序电流控制的电网短路电流对称分量迭代算法。文献[23]将新能源并网点电压等值为恒定电流源,并将节点电压方程与新能源电流方程进行整合,以电压为迭代变量进行迭代计算。然而,这些方法的有效性高度依赖于建模的鲁棒性以及迭代算法的收敛

性,应用于大规模系统时,模型的收敛性可能存在问题。

综上所述,现有研究在新能源短路电流计算方面取得了显著进展,但仍存在一些亟待解决的问题:1)多数简化模型难以精确描述新能源在不同电压跌落水平下的动态、非线性、多阶段响应特性,如无功优先、电流限幅及有功控制策略的精细化差异;2)新能源精细化模型依赖于难以获取的内部控制参数,限制了其实用性;3)在大规模系统中,兼顾计算精度与效率的有效方法仍显不足,缺乏将精细化的新能源模型高效集成到全网计算中的实用方法。

为应对上述挑战,本文提出一种基于分区线性化诺顿等值的高比例新能源电力系统短路电流计算方法,该方法的主要贡献在于:

1)构建了能够反映新能源在不同电压区间(外部区、影响区、核心区)行为差异的实用化电压-电流映射模型,该模型基于公开的并网导则或设备规格参数,摆脱了对复杂内部控制信息的依赖。

2)针对关键的“影响区”,推导了随工作点(即新能源机端电压)变化的线性化诺顿等值参数(等效电流源和等效导纳),相比固定参数模型更能捕捉非线性响应。

3)提出了基于故障影响区域自适应划分的分区迭代策略,将精细化的诺顿等值模型应用于故障核心及影响区域,而对外部区域采用简化处理,从而在保证精度的前提下提升了计算效率。

这种分区、分模型、迭代优化的思路,有望为高比例新能源电力系统的短路电流精确、高效计算提供一种实用化解决方案。在改进3机9节点和IEEE 30节点系统仿真算例中,所提方法相较于IEC 60909标准的计算方法,其计算误差显著降低,且与MATLAB/Simulink仿真结果高度吻合,验证了其有效性和准确性。

1 通用并网变流器控制系统

典型的跟网型(grid-following, GFL)变流器控制结构如图1所示,其核心由锁相环(phase locked loop, PLL)、电流内环和功率/电压外环构成。图1中: $I_{p,cmd}$ 、 $I_{q,cmd}$ 分别为有功功率控制策略输出电流、无功功率控制策略输出电流; $I_{p,ref}$ 、 $I_{q,ref}$ 分别为有功电流参考值、无功电流参考值; I_p 、 I_q 分别为经逆变器输出的有功电流、无功电流; U_{dc} 为直流侧电压; I_{array} 为光伏方阵电流; I_{sorc} 为受控电流源电流。

锁相环:PLL实时跟踪并网点的电压相角,并以此为基准进行dq坐标变换,确保控制系统与电网同

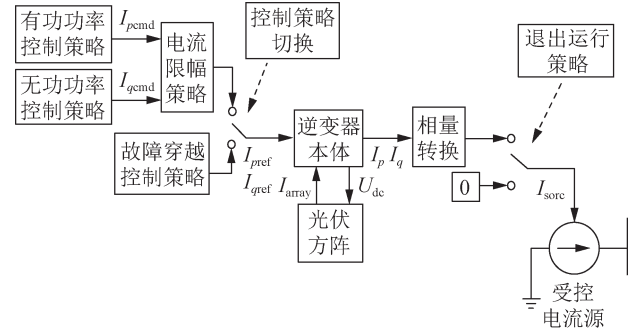


图1 通用并网变流器d-q解耦控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of universal grid-connected converter d-q decoupling control system

步。在故障前或电网参数缓慢变化的准稳态条件下,可以认为PLL理想锁相,将公共连接点(point of common coupling, PCC)电压矢量完全对齐到d轴,即:

$$\begin{cases} U_d = U_{pcc} \\ U_q = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_{pcc} 为PCC电压幅值; U_d 、 U_q 分别为电压的d轴和q轴分量。

电流内环:采用比例积分(proportional-integral, PI)控制器的快速电流内环负责解耦控制d轴和q轴电流(I_d 、 I_q),使其精确跟踪外环给出的电流参考值($I_{d,ref}$ 、 $I_{q,ref}$)。由于其响应速度远快于外环和电网动态,在短路电流计算关注的机电暂态时间尺度上,可认为电流能够瞬时跟踪参考值。

$$\begin{cases} I_d = I_{d,ref} \\ I_q = I_{q,ref} \end{cases} \quad (2)$$

功率/电压外环与LVRT逻辑:外环根据系统运行目标(如最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT))和电网状态(如电压跌落深度)生成电流参考值。这是决定故障响应特性的核心。

典型的LVRT控制逻辑如下:

有功电流参考 $I_{d,ref}$:正常运行时,为实现MPPT,有功电流参考值与PCC电压成反比以维持恒定功率输出。在LVRT期间,为优先保证无功支撑,有功电流会根据无功电流的大小和总电流限幅进行调整。

无功电流参考 $I_{q,ref}$:正常运行时, $I_{q,ref}$ 通常为0(单位功率因数运行)。当PCC电压跌落进入LVRT区域时,为提供电压支撑,控制器会根据电压跌落深度动态生成无功电流参考值。

电流限幅:变流器的物理约束体现在总电流幅值不能超过其最大允许值 I_{lim} ,即:

$$\sqrt{I_d^2 + I_q^2} \leq I_{lim} \quad (3)$$

2 故障中新能源电压-电流映射模型推导

对于高比例新能源电力系统,新能源分布范围广、出力占比高。同一故障下不同位置的新能源电压也有所不同,而新能源的电流输出特性与新能源端电压有关。端电压不同,对应新能源处在不同状态,短路电流输出特性不同。因此,在高比例新能源电力系统中,需要考虑不同位置的新能源场站电压不同的问题。

具体地,为方便计算分析,在不同端电压的情况下,可按短路故障对新能源影响程度分为3个区域,即核心区、影响区与外部区。

1)外部区:外部区新能源场站指受故障影响,电压降低,但未进入低电压穿越的情况,该类型的新能源场站表现为无功电流略有增加。

2)影响区:影响区新能源场站指受到故障影响,新能源场站电压跌至低电压穿越阈值以下,新能源无功电流由低电压穿越控制策略决定。

3)核心区:核心区新能源场站指距离故障点十分接近,且新能源场站无功电流出力达到限额的情况。

2.1 外部区

外部区指电压正常或轻微跌落区,即:

$$U_p \geq U_{th,high} \quad (4)$$

式中: U_p 为新能源机端电压; $U_{th,high}$ 为新能源场站的低电压穿越阈值,一般取0.9 p. u.。此区域的新能源场站未进入低电压穿越状态,但随着电压轻微跌落,新能源为维持有功出力保持不变,则将对对应提高有功电流,因此,新能源的有功电流输出为:

$$I_d(U_p) = \min \left(\frac{|U'_p|}{|U_p|} I'_d, I_{lim} \right) \quad (5)$$

式中: I'_d 为故障前有功电流; U'_p 为故障前新能源机端电压。

此区域内,新能源不参与电压调节,则新能源输出的无功电流为0,即:

$$I_q(U_p) = 0 \quad (6)$$

2.2 影响区

影响区是指电压跌落较多,导致新能源进入低电压穿越,采用无功优先策略,输出大量无功功率,且新能源无功电流可能达到限额的区域。一般电压范围在 $U_{th,low} \leq U_p < U_{th,high}$,其中, $U_{th,low}$ 一般取0.2 p. u.。由文献[24]可知,当新能源出现电压跌落时,在电流限幅范围内,新能源无功电流输出与电压跌落程度成正比,即:

$$I_q(U_p) = k_{slope} (U_{th,high} - U_p) \quad (7)$$

式中: k_{slope} 为无功电流比例系数。

考虑新能源无功存在电流限幅 I_{lim} ,则新能源的无功电流可表示为:

$$I_q(U_p) = \min \{ k_{slope} (U_{th,high} - U_p), I_{lim} \} \quad (8)$$

类似地,有功电流同样需要考虑电流限幅,当无功电流达到限幅时,有功电流为0,因此,有功电流的表达式为:

$$I_d(U_p) = \sqrt{\max \{ 0, I_{lim}^2 - [I_q(U_p)]^2 \}} \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)可得有功电流的详细表达式。

2.3 核心区

深度跌落区指电压严重跌落,新能源注入最大无功电流,或者达到总电流限值完全由无功贡献,则此时有:

$$I_q(U_p) = I_{lim} \quad (10)$$

$$I_d(U_p) \approx 0 \quad (11)$$

通过在不同电压区间推导新能源输出电流表达式,构成了基于典型低电压穿越控制逻辑的新能源实用化电压-电流映射模型。该模型考虑了新能源机组在故障下机端电压对新能源无功支撑的影响,同时考虑了电流限幅,刻画了新能源场站在故障中的核心外部行为。相比于IEC 60909标准体系中的短路电流简化计算方法,所提方法将新能源分为外部区、影响区和核心区3个部分,更加准确地刻画了新能源在故障过程中的短路电流特性。

此外,由于新能源场站对于模型的保密性,影响新能源短路电流的内部具体控制参数以及复杂模型难以获取。而本文所提方法摆脱了对这些复杂信息的依赖,仅靠几个从并网导则或设备规格中相对容易获取或估计的参数,即可实现短路电流的计算,具有很强的实用价值。

3 线性化诺顿等效模型推导

由于式(8)和式(9)为电流和电压的强非线性模型,难以直接进行求解和计算。本文考虑将其进一步等效,推导在某个工作点($U_{p0}, I_0 = I_{d0} + jI_{q0}$)附近的诺顿等效模型。该模型由一个等效电流源 I_{eq} 并联一个等效导纳 $Y_{eq} = G_{eq} + jB_{eq}$ 构成。

等效电流源 I_{eq} 可以取工作点电流 I_0 ,因此,重点在于求解随工作点变化的等效导纳 $Y_{eq}(U_{p0})$ 。具体地,基于短路电流的常用近似,忽略相角变化对短路电流的影响,则有:

$$Y_{\text{eq}} = G_{\text{eq}} + jB_{\text{eq}} \approx \left(\frac{\partial I_d}{\partial U_p} + j \frac{\partial I_q}{\partial U_p} \right) \Big|_{U_{p0}} \quad (12)$$

在影响区 ($U_{\text{th,low}} \leq U_p < U_{\text{th,high}}$), 考虑新能源的无功电流未达到限值, 将式(3)代入式(8)可得等效电纳的表达式, 则有:

$$B_{\text{eq}} = \frac{\partial I_q}{\partial U_p} = \frac{\partial}{\partial U_p} [k_{\text{slope}}(U_{\text{th,high}} - U_p)] = -k_{\text{slope}} \quad (13)$$

由式(13)可知, B_{eq} 是一个常数, 表示电压每升高1标么值, 注入的无功电流减少 k_{slope} 标么值。

等效电导 G_{eq} 反映有功电流对电压的响应, 其计算式为:

$$G_{\text{eq}} = \frac{\partial I_d}{\partial U_p} = \frac{\partial}{\partial U_p} \sqrt{I_{\text{lim}}^2 - [I_q(U_p)]^2} = \frac{-1}{\sqrt{I_{\text{lim}}^2 - [I_q(U_p)]^2}} \cdot I_q(U_p) \cdot \frac{\partial I_q}{\partial U_p} \quad (14)$$

将式(7)、式(9)和式(8)、式(13)代入式(14)可得:

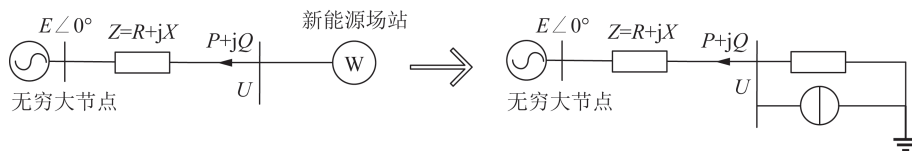


图2 新能源场站戴维南等值过程

Fig. 2 The process of Thevenin equivalent for renewable energy power station

如图2所示, 基于本文所提方法, 将新能源场站进行诺顿等值, 即可作为电流源加入节点电压方程, 通过潮流计算的方式计算短路电流。具体地, 各个节点电压和短路电流的网络方程^[25-29]为:

$$Y_{\text{internal}} U_{\text{internal}} = I_{\text{inj, internal}}(U_{\text{internal}}, U_{\text{outer}}) \quad (17)$$

式中: $I_{\text{inj, internal}}$ 为内部节点注入电流向量, 是当前电压和外部电压的函数; U_{internal} 为内部电压向量; U_{outer} 为外部电压向量; Y_{internal} 为内部节点导纳矩阵。

将影响区的新能源场站等值导纳加入节点导纳矩阵, 形成内部节点导纳矩阵 Y_{internal} , 保持外部区注入电流 I_{outer} (或等效到边界节点的注入) 不变, 通过内部直接法 (如下三角-上三角LU分解) 或迭代法 (如牛顿法、高斯-赛德尔法) 求解内部区域的网络方程^[19-20], 即可得到新的内部电压向量 U_{internal} (包含核心区电压向量 U_{core} 和影响区电压向量 U_{buffer})。

4 分区迭代优化步骤

为了将上述实用化模型应用于大规模系统短路电流计算, 同时解决全局迭代效率低的问题, 提出一种基于故障影响区域自适应划分的分区迭代优化计算策略, 如图3所示。该策略的核心思想是将计算资

$$G_{\text{eq}} = \frac{-I_q(U_p)}{I_d(U_p)} (-k_{\text{slope}}) = \frac{k_{\text{slope}} I_q(U_p)}{I_d(U_p)} \quad (15)$$

在工作点 U_{p0} 处, 则有:

$$G_{\text{eq}}(U_{p0}) = \frac{k_{\text{slope}} I_{q0}}{I_{d0}}, I_{d0} \neq 0 \quad (16)$$

式(16)给出了在低电压穿越线性工作区内, 新能源机组的等效诺顿导纳的计算方法。其导纳 $Y_{\text{eq}}(U_{p0}) = G_{\text{eq}}(U_{p0}) + jB_{\text{eq}}$ 是随新能源机端电压 U_{p0} (通过 I_{d0} 和 I_{q0} 体现) 变化的。这种随工作点变化的诺顿模型比恒定阻抗或恒流源更能反映新能源的非线性响应特性。值得注意的是, 式(13)和式(16)在实际应用过程中, 需要获取新能源机端电压 U_p 。然而在实际计算中, 机端电压 U_p 的值未知, 需要与短路电流一起进行联合迭代求解。

基于以上步骤, 即可将新能源由电流和电压间的非线性耦合模型转化为分段诺顿等值模型, 如图2所示。

源 (精细模型和迭代计算) 集中在受故障影响最显著的区域, 对不同区域采用不同复杂度的模型和计算方法, 从而在精度和效率间取得平衡。

步骤1: 参数获取和电压初步估计。获取电网拓扑、线路/变压器参数、负荷数据、新能源位置、容量、控制参数。进行快速、初步的短路电流计算, 并初步获取各节点电压 $U^{(0)}$ 。

步骤2: 故障影响区域划分。根据现有电压分布 $U^{(k-1)}$, 以电压阈值 $U_{\text{th,low}}$ 和 $U_{\text{th,high}}$ 为边界, 将网络中的所有新能源节点划分核心区 Ω_{core} 、影响区 Ω_{buffer} 、外部区 Ω_{outer} 。

步骤3: 模型选择与参数配置。根据区域划分结果, 为不同区域的新能源机组选择不同复杂度的模型。其中, 核心区主要考虑新能源的最大无功输出电流; 影响区主要考虑新能源低电压穿越特性, 并将其转化为线性诺顿导纳模型; 外部区主要考虑新能源的有功保持策略。

步骤4: 分区迭代计算。

1) 更新诺顿等效电流值: 根据当前迭代步 k 的电压 $U_{\text{core}}^{(k)}$ 与 $U_{\text{buffer}}^{(k)}$, 基于步骤3中不同区域的新能源模型, 计算更新后的新能源注入电流 $I_{\text{core}}^{(k+1)}$ 与 $I_{\text{buffer}}^{(k+1)}$ 。

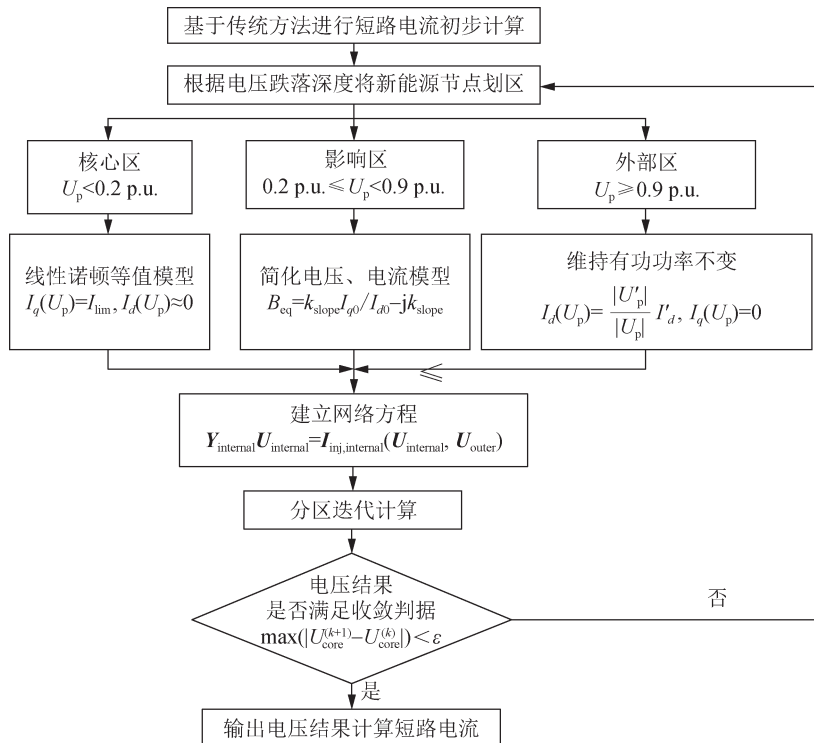


图 3 基于分区线性化诺顿等值的高比例新能源电力系统短路电流计算方法流程

Fig. 3 Flowchart of short-circuit current calculation method for high proportion renewable energy power system based on zonal linearized Norton equivalents

2)更新诺顿等效导纳值:以当前迭代步 k 的电压和电流基于式(13)和式(16)对新能源诺顿等值导纳 B_{eq}^k 和 G_{eq}^k 进行更新。

3)求解内部网络方程:将第 k 次迭代获取的诺顿等值导纳 B_{eq}^k 和 G_{eq}^k 加入节点导纳矩阵中,建立式(17),通过内部直接法(如下三角-上三角LU分解)或迭代法(如牛顿法、高斯-赛德尔法)求解内部区域的网络方程,得到新的内部电压 $U_{internal}^{(k+1)}$ (包含 $U_{core}^{(k+1)}$ 与 $U_{buffer}^{(k+1)}$)。

步骤 5:收敛性判断。检查内部区域电压的变化量是否小于设定的收敛精度 ϵ , 即:

$$\max |U_{core}^{(k+1)} - U_{core}^{(k)}| < \epsilon \quad (18)$$

如果满足收敛条件,则迭代结束;否则,令 $k=k+1$,返回步骤 2,继续迭代。通常设置最大迭代次数限制以防止不收敛。

步骤 6:结果整合与输出。迭代收敛后,得到最终的核心区电压 U_{core}^* 和影响区电压 U_{buffer}^* 及相应的新能源注入电流,将该结果与外部区的信息整合,计算全网的支路电流分布,特别是校验的开关设备处的短路电流 $I_{sc,CB}$ 。

5 仿真分析

按照本文所提短路电流计算步骤,基于 MATLAB 中 Matpower 计算程序,编制了对应的短路电流计算

模块。同时,在 MATLAB/Simulink 中分别搭建相应模型,并设置短路电流故障通过机电暂态和电磁暂态时域仿真,用于验证所提方法的正确性。

5.1 3机9节点系统仿真

首先,基于 IEEE 典型 3 机 9 节点系统,验证电压跌落较深情况下所提方法的准确性。在 Simulink 中建立如图 4 所示的 3 机 9 节点系统,并在 8 节点和 5 节点分别加入 2 个直驱风电场,额定容量分别为 90、70 MVA,分别设置输出功率为 $70+j10$ 、 $60+j5$ MVA,其他参数保持不变。

在母线 7 设置三相短路故障,分别采用本文所提方法和 Simulink 计算短路电流以及系统各节点母线

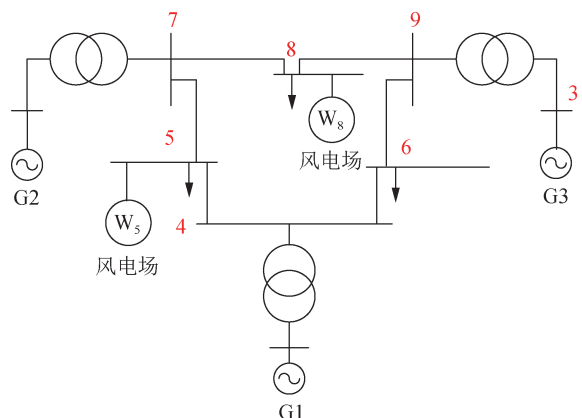


图 4 改进的 3 机 9 节点电力系统拓扑

Fig. 4 Modified 3-machine 9-node power system topology

电压,暂态过程中的短路电流曲线如图 5 所示,母线电压分布情况如图 6 所示。本文所提的短路电流计算结果是指故障过程中短路电流的最大值。

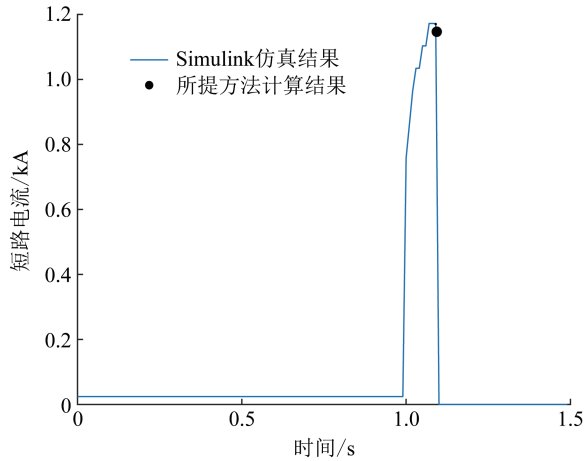


图 5 改进的 3 机 9 节点电力系统母线 7 短路电流

Fig. 5 Short-circuit current of bus 7 in the modified 3-machine 9-node power system

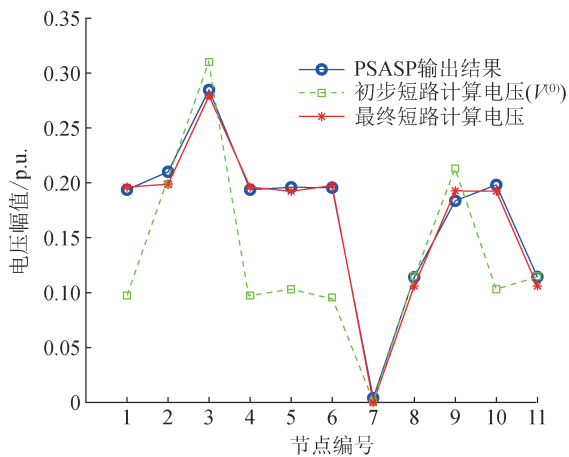


图 6 短路期间各节点正序电压曲线

Fig. 6 Positive sequence voltage curve of nodes during short circuit

如图 6 所示, Simulink 的输出结果与所提方法短路电压的计算结果接近, 说明所提方法的电压计算结果有效, 进一步对 IEC 中的短路电流计算方法进行复现, 以 Simulink 短路电流的仿真结果作为参考, 比较不同方法下的短路电流计算结果, 如表 1 所示。

表 1 3 机 9 节点电力系统中的短路电流计算结果
Table 1 Short-circuit current calculation results in the 3-machine 9-node power system

计算方法	短路电流幅值/kA	计算误差/%	计算时间/s
Simulink 仿真结果	1.18		21.0
所提方法	1.17	-0.85	0.7
IEC 计算方法	1.10	-6.78	0.5

由表 1 可知, 在仿真结果精度方面, 所提方法的短路电流计算结果与 Simulink 中的仿真结果接近, 说明所提方法有效。在计算时间方面, 所提方法相对于 Simulink 仿真, 计算时间大大减少, 进一步证明了方法的工程实用性。在核心区电压计算方面, 本算例的设计目的在于验证所提方法在核心区 ($U < 0.2$ p. u.) 的表现, 由图 6 可见, 仿真电压结果大部分在 0.2 p. u. 以下 (属于核心区), 且计算结果与 Simulink 的仿真结果接近, 说明方法在核心区计算精度较高。

5.2 IEEE 30 节点系统仿真

本算例旨在验证方法在核心区和影响区的准确性, 因此采用系统规模较大的 IEEE 30 节点系统。具体地, 在 Simulink 中分别建立 IEEE 30 节点系统, 并在节点 2、4、15 分别接入直驱风电场、双馈风电场以及光伏电站, 其出力分别为 $30+j2$ 、 $50+j5$ 、 $40+j8$ MVA, 占该系统总出力的 53%, 属于高比例新能源电力系统, 其他参数保持不变。在母线 7 设置三相短路故障, 分别应用本文所提方法和 Simulink 计算 3 个新能源场站的无功电流输出, 结果如表 2 所示。

表 2 故障中 3 个新能源场站的无功电流输出情况
Table 2 Reactive current output situation of three new energy stations under fault conditions

节点编号	无功电流/p.u.	
	计算值	Simulink 仿真值
2	0.530	0.528
4	0.627	0.601
15	0.604	0.614

由表 2 可见, 基于所提方法计算得到的无功电流与 Simulink 输出的无功电流十分接近, 说明本文所提的线性化诺顿等值电流计算方法有效, 通过将风电场划分为核心区、影响区和外部区, 能够准确刻画风电场的无功电流输出, 为短路电流的计算提供了坚实的基础。

进一步地, 分别用本文所提方法以及 Simulink 计算短路电流, 结果如图 7 所示, 系统各节点母线电压结果如图 8 所示。

如图 8 所示, Simulink 的输出结果与所提方法计算的电压计算结果接近, 说明所提方法的电压计算结果有效, 进一步对 IEC 中的短路电流计算方法进行复现, 以 Simulink 短路电流的仿真结果作为参考, 比较不同方法下的短路电流, 如表 3 所示。

如表 3 所示, 在仿真精度方面, 所提方法的短路电流计算结果与 Simulink 中的仿真结果接近, 说明所提方法有效。而 IEC 算法误差相对较大, 原因在于, IEC 算法通过简单分段电流源近似替代新能源在故

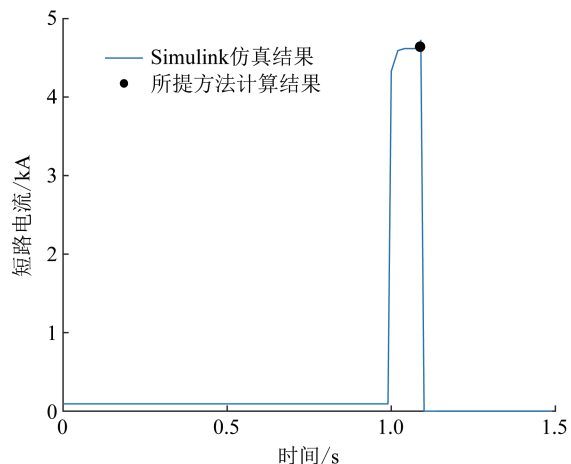


图7 IEEE 30节点系统母线7三相永久短路电流

Fig. 7 Three-phase permanent short-circuit current at bus 7 of the IEEE 30-bus system

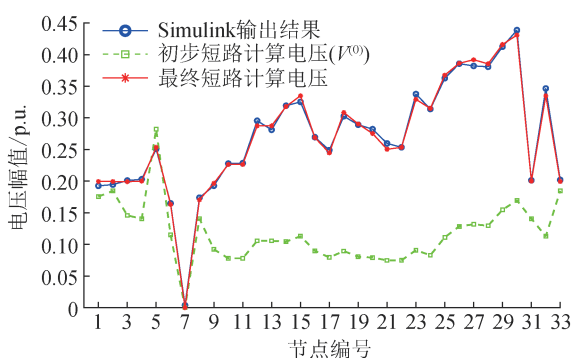


图8 母线7三相短路期间各母线正序电压曲线

Fig. 8 Positive-sequence voltage curves at each bus during a three-phase short circuit at bus 7

表3 IEEE 30节点系统中的短路电流计算结果
Table 3 Short-circuit current calculation results in the IEEE 30-bus system

计算方法	短路电流幅值/kA	计算误差/%	计算时间/s
Simulink 仿真	4.45		42.0
所提方法	4.42	0.67	1.1
IEC 计算方法	4.03	-9.40	0.9

障下短路电流贡献,主要反映了限流能力和低电压穿越期间无功优先策略,在IEEE 9节点系统新能源较少且近区故障时精度较高。由于其忽略了故障前新能源负荷电流以及电压跌落较浅时新能源增加有功电流机制,在IEEE 30节点新能源较多时精度会有所下降。而所提方法考虑了不同接入点新能源不同短路电流特性,具有更好的计算精度。在仿真时间方面,所提方法的计算时间远低于Simulink仿真时间,所提方法和IEC计算方法都能够快速进行短路电流计算,说明了所提方法的工程实用性。

此外,本算例的设计目的在于验证所提方法在核

心区($U_p < 0.2 \text{ p.u.}$)及影响区($0.2 \text{ p.u.} \leq U_p < 0.9 \text{ p.u.}$)的表现,由图8可知,仿真电压结果大部分在0.5 p.u.以下,且计算结果与Simulink的仿真结果接近,说明方法在核心区和影响区的计算精度较高。

6 结论

本文提出了一种基于分区线性化诺顿等值的高比例新能源电力系统短路电流计算方法,方法考虑了新能源在不同电压下的有功无功响应及限流特性,修正了传统仿真方法中可能低估的短路电流的风险。所提方法的优势在于,得益于诺顿等值的精确性,方法无须进行电磁暂态仿真,通过迭代即可实现短路电流的高精度求解,具有较强的实用性。相比于传统算法,所提方法将不同电压跌落程度的新能源划分为核心区、影响区和外部区,并分别建立相应的模型,提高了短路电流的精确性。在未来的工作中,可将所提方法进一步适配于大电网模型,实现高比例新能源电力系统的短路电流计算。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明 (Authors' Contributions):

任冲和崔明建提出了总体研究方案并完成主要内容写作;行舟、程林和孔贺参与了仿真模型搭建;行舟和孔贺完成了仿真实验并分析了数据;行舟、程林和孔贺参与了论文写作;崔明建参与了论文修订。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

7 参考文献

- [1] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-26.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26.
- [2] 刘振亚. 全球能源互联网跨国跨洲互联研究及展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5103-5110.
LIU Zhenya. Research of global clean energy resource and power grid interconnection [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5103-5110.
- [3] 刘昊霖, 贾科, 毕天姝, 等. 计及新能源耦合特性的柔直换流站短路电流解析[J]. 电工技术学报, 2025, 40(15): 4835-4844.
LIU Haolin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Analysis of short-circuit current in flexible DC converter stations considering the coupling characteristics of new energy sources [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(15): 4835-4844.
- [4] 王彤, 何淑威, 魏玉文, 等. 不对称故障期间VSG电压源特性控制策略下的短路电流解析计算[J]. 电力自动化设备, 2025, 45

- (10): 201-209, 224.
- WANG Tong, HE Shuwei, WEI Yuwen, et al. Analytical expression of short circuit current under voltage source characteristic control strategy of VSG during asymmetric fault [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(10): 201-209, 224.
- [5] 孔贺, 侯山, 赵弋菡, 等. 低电压穿越控制诱导的陆上风电场电压振荡的分岔分析及其判据研究[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(21): 8475-8487.
- KONG He, HOU Shan, ZHAO Yihan, et al. Bifurcation analysis and criteria of voltage oscillation induced by low voltage ride through control in onshore wind farms [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(21): 8475-8487.
- [6] 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.
- [7] 戴志辉, 李涵伟, 李毅然. 复杂多端柔直配电网短路故障全过程全网特征量计算方法[J]. *高电压技术*, 2024, 50(11): 4837-4849.
- DAI Zhihui, LI Hanwei, LI Yiran. Short-circuit calculation method of whole network characteristic quantity during the whole fault process in complex multi-terminal flexible DC distribution network [J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(11): 4837-4849.
- [8] 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.
- [9] 周涛, 姚嘉辰, 倪俊, 等. 基于改进模糊自适应控制的风电机组逐步惯性最优控制策略[J]. *浙江电力*, 2025, 44(11): 35-47.
- ZHOU Tao, YAO Jiachen, NI Jun, et al. An optimal stepwise inertial control strategy for wind turbines based on improved fuzzy adaptive control [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2025, 44(11): 35-47.
- [10] 邵尹池, 巩宇, 牛萌, 等. 计及相角与幅值跳变的构网型储能短路电流特性及其计算模型[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(6): 2451-2461.
- SHAO Yinchu, GONG Yu, NIU Meng, et al. Grid-forming energy storage system taking phase angle and amplitude jumps into account short-circuit current characteristics and its calculation model [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(6): 2451-2461.
- [11] KAUFFMANN T, KARAAGAC U, KOCAR I, et al. An accurate type III wind turbine generator short circuit model for protection applications [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32(6): 2370-2379.
- [12] WANG Z Y, HAO L L, WANG Z M. Short-circuit current calculation of flexible direct current transmission lines considering line distribution parameters [J]. *Energies*, 2024, 17(15): 3800.
- [13] LIU D, XIONG P, TANG J R, et al. Real-time short-circuit current calculation in electrical distribution systems considering the uncertainty of renewable resources and electricity loads [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(23): 11001.
- [14] YE R K, WANG H F, BASHIR T, et al. Fast and accurate method for short-circuit current calculation in distribution network with IIDGs [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2024, 155: 109622.
- [15] FENG H W, DING T. Block-based selected inversion for computing three-phase selected short-circuit currents in large-scale high-voltage power systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2025, 40(3): 2803-2806.
- [16] 齐金玲, 李卫星, 晁璞璞, 等. 直驱风机故障穿越全过程的通用电磁暂态建模方法[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(4): 1428-1442.
- QI Jinling, LI Weixing, CHAO Pupu, et al. Generic electromagnetic transient modeling method for complete fault ride-through processes of direct-driven wind turbine generators [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(4): 1428-1442.
- [17] 三相交流系统短路电流计算 第 1 部分: 电流计算: GB/T 15544.1—2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- Short-circuit current calculation in three-phase A. C. systems: part 1: calculation of currents: GB/T 15544.1—2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [18] 王清, 薛安成, 张晓佳, 等. 双馈风机下垂控制对系统小扰动功角稳定的影响机理分析[J]. *电网技术*, 2017, 41(4): 1091-1097.
- WANG Qing, XUE Ancheng, ZHANG Xiaojia, et al. Mechanism analysis of droop control of DFIG influence on system small-signal dynamic stability based on damping torque analysis [J]. *Power System Technology*, 2017, 41(4): 1091-1097.
- [19] 于琳, 孙华东, 赵兵, 等. 新能源并网系统短路比指标分析及临界短路比计算方法[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(3): 919-928.
- YU Lin, SUN Huadong, ZHAO Bing, et al. Short circuit ratio index analysis and critical short circuit ratio calculation of renewable energy grid-connected system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(3): 919-928.
- [20] 王清, 薛安成, 郑元杰, 等. 双馈型风电集中接入对暂态功角稳定的影响分析[J]. *电网技术*, 2016, 40(3): 875-881.
- WANG Qing, XUE Ancheng, ZHENG Yuanjie, et al. Impact of DFIG-based wind power integration on the transient stability of power systems [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(3): 875-881.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [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] 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.
Technical specification for connecting wind farm to power system: part 1: on shore wind power: GB/T 19963.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [25] 刘闯,王锡龙,任洛瑶,等. 含LCC-HVDC的交直流系统D-Q建模与潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(5): 145-152.
LIU Chuang, WANG Xilong, REN Mingyao, et al. D-Q modeling and power flow calculation for AC/DC system with LCC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(5): 145-152.
- [26] 李雪,高翔,姜涛,等. 电力系统全纯嵌入潮流的并行计算[J]. 电工技术学报, 2024, 39(18): 5839-5854.
LI Xue, GAO Xiang, JIANG Tao, et al. Parallel computing method of power system holomorphic embedded power flow [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(18): 5839-5854.
- [27] 孙秋野,陈会敏,杨家农,等. 牛顿类潮流计算方法的收敛性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2196-2200.
SUN Qiuye, CHEN Huimin, YANG Jianong, et al. Analysis on convergence of Newton-like power flow algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2196-2200.
- [28] 雷婧婷,安婷,杜正春,等. 含直流配电网的交直流潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 911-918, 1174.
LEI Jingting, AN Ting, DU Zhengchun, et al. A unified AC/DC power flow algorithm with DC distribution [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 911-918, 1174.
- [29] 陈恳,魏艺君,熊哲浩,等. 基于稀疏技术的快速高斯-赛德尔潮流算法[J]. 南昌大学学报(工科版), 2020, 42(1): 85-89, 97.
CHEN Ken, WEI Yijun, XIONG Zhehao, et al. A fast Gauss-Seidel power flow algorithm for power system based on sparse technology [J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2020, 42(1): 85-89, 97.

收稿日期: 2025-07-07 修回日期: 2025-08-23

作者简介:

任冲(1984),男,硕士,教授级高级工程师,主要研究方向为电网运行与控制;

行舟(1971),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电力系统计算分析、稳定控制及运行管理;

程林(1982),男,硕士,教授级高级工程师,主要研究方向为新能源发电消纳及电网稳定安全;

孔贺(1996),男,博士,工程师,主要研究方向为新能源并网的稳定与控制;

崔明建(1987),男,博士,教授,通信作者,主要研究方向为电力系统优化运行, E-mail: mj_cui@tju.edu.cn。

(编辑 景贺峰)



任冲