

基于短路电流约束的新能源最大接入容量 实用化计算方法

潘 艳¹, 李付强¹, 黄明辉², 赵 伟¹, 张 野², 张文朝²

(1. 国家电网有限公司华北分部, 北京 100053; 2. 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京 100192)

摘 要:随着并网新能源规模的迅猛增加, 对短路电流的贡献愈发凸显。针对新能源最大装机容量难以估计的问题, 提出了一种基于短路电流约束的新能源最大接入容量实用化计算方法。通过计算新能源固定装机容量接入高电压等级汇集站对短路电流的贡献值, 并根据现有系统中高电压等级汇集站的短路电流与断路器遮断容量的差值, 在保障断路器遮断能力的前提下, 折算出新能源最大接入容量。所提方法可有效评估新能源接入电网时对电网短路电流的贡献问题, 并简单快速得出集中并网点可接入新能源最大装机规模。实际电网算例计算表明, 所提方法具有良好的指导意义和实际应用价值。

关键词:新能源最大装机规模; 短路电流计算; 新能源并网; 接入容量实用化计算

中图分类号: TM 612 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2025)02-0032-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20250205

Practical Calculation Method for Maximum Capacity of New Energy Access Based on Short-circuit Current Constraint

PAN Yan¹, LI Fuqiang¹, HUANG Minghui², ZHAO Wei¹, ZHANG Ye², ZHANG Wenchao²

(1. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China;

2. Beijing Kedong Power Control System Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: With the rapid increase in the scale of grid-connected new energy, the contribution to short-circuit current is becoming increasingly prominent. Aiming at the difficulty in estimating the maximum installed capacity of new energy, a practical calculation method for the maximum capacity of new energy access to power grid based on short-circuit current constraints is proposed. Through calculating the contribution value to short-circuit current by the fixed installed capacity of new energy access to high voltage level collection stations, and according to the difference between the short-circuit current of high voltage level collection stations and the breaking capacity of circuit breaker in the existing system, the maximum capacity of new energy access to power grid is calculated under the premise of ensuring the breaking capacity of circuit-breaker. The proposed method can effectively evaluate the contribution of short-circuit current when new energy access to power grid, and can easily and quickly determine the maximum installed capacity of new energy that can be connected to the centralized grid-connecting point. Actual grid calculation examples show that the proposed method has good guiding significance and practical application value.

Key words: maximum installed capacity of new energy; short-circuit current calculation; new energy grid connection; practical calculation of access capacity

0 引 言

随着清洁能源的大力发展, 以风电、光伏为代表的可再生能源的开发与应用进入高速发展阶段^[1]。

基金项目: 国家电网有限公司华北分部项目“计及电压源电流源设备影响短路电流水平下的网架优化技术研究”(SGNC0000FZJS2310247)

由于受自然条件的约束, 新能源电能多以集中接入的形式将功率馈入电网。伴随新能源电源并网友容量的大幅提升, 新能源大规模接入占用了常规机组开机空间, 场站短路电流水平接近或超过断路器额定遮断电流等问题日益突出^[2]。世界各国都出台了风力发电机组和光伏发电装置并网规范, 要求当电网发生短时间故障时, 新能源厂站仍能持续运行, 即

具备低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)能力^[2-3]。新能源电源在实施 LVRT 后,当电网故障时即向外馈出短路电流^[4]。短路电流超标可能会影响系统的安全性,甚至会导致大电网崩溃^[5-7]。随着新型电力系统的建设,新能源必将成为主力电源,而短路电流已经成为制约交流网架进一步加强的主要因素,新能源的接入规模终将达到上限。在短路电流的限制下,集中网点所能接入的新能源最大装机容量已经成为各方关注的焦点。

为评估新能源接入容量,国内外学者进行了众多研究。文献[8]基于恒电流模型,研究了分布式发电接入位置和注入容量的上限。文献[9]研究了保证系统运行安全稳定的前提下,配电网最大可接入的分布式光伏容量。文献[10]考虑分布式光伏出力及负荷的不确定性,用区间过电压风险衡量电压越限严重程度,并提出了配电网光伏承载能力评估方法。文献[11]基于混合整数非线性规划问题,分析了新能源的最优接入位置与最大渗透率。文献[12-13]引入机会约束刻画约束越限的概率,以此反映新能源预测误差的不确定性,建立基于机会约束的新能源最大并网容量评估模型。文献[14]考虑了光伏电源不同功率因数下电压波动因数,建立了各节点最大容量可接入方案。文献[15]通过配电网的分区消纳策略实现了分布式新能源的就地消纳,提高了系统的接入能力。文献[16]通过主动配电网的快速遍历重构方法有效遏制了功率倒送所带来的电压抬升问题。文献[17]针对传统配电网分布式光伏承载能力评估方法中未考虑光伏集群的问题,构建了一种以光伏集群为评估单元的承载能力双层评估模型,以不向主网反送电作为指标,考虑电压偏差和设备热稳定约束,提出灵敏度排序方法求取光伏承载能力。文献[18]在含有多电压等级的系统中测试得出,联络线协同各区能实现一体化消纳和新能源渗透率提升。

目前现有文献大部分研究是针对单电网或者是单个上、下两级电网间的新能源承载能力进行评估。对于汇集电网中新能源的承载能力如何评估并没有给出有说服力的方法,仍需针对多层级汇集网络的承载能力问题提出实用化计算方法。同时,短路电流作为电力系统重要运行指标,以短路电流为约束评估新能源接入容量却少有研究。

综上所述,下面提出一种基于短路电流约束的

汇集系统新能源最大接入容量实用化计算方法。首先计算固定新能源装机容量接入高电压等级汇集站对短路电流的贡献值,再基于实际运行系统中高电压等级汇集站的短路电流与断路器遮断容量的差值,折算出汇集网络新能源最大接入容量。

1 电流源提供短路电流公式推导

传统电力系统中的电源以同步发电机为主,电力电子性质的电源比例非常小,电网中的故障电流主要由同步发电机贡献。直驱风机、光伏、储能等属于全功率换流设备,这些电源输出的电流由换流器的控制环节决定,具有可整定的性质。在故障瞬间这些电源可近似模拟为与机端电压相关的可变电流量。

带可变电流量源的两节点小系统如图1所示。图中: X_{pv} 为新能源机组的等值电抗(约等于0); X_s 为同步发电机组等值电抗; X_L 为输电线路电抗; X_1 为负荷等值电抗; U_A 为母线A正常运行方式下的母线电压; U_B 为母线B正常运行方式下的母线电压。

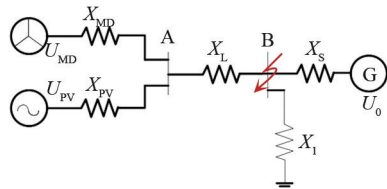


图1 带可变电流量源的两节点小系统

如果在母线B附近发生三相短路故障,短路电流计算步骤如下:

1) 初始状态计算。进行小系统潮流计算,确定母线A电压 U_A 、母线B电压 U_B 、线路电抗 X_L 、负荷电抗 X_1 、同步机组电抗 X_S 、同步发电机出力、感应电动机负荷、电流源输出功率。

2) 形成系统阻抗矩阵。两节点系统矩阵 Z 表示为

$$\begin{cases} Z = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} \\ Z_{BA} & Z_{BB} \end{bmatrix} \\ Z_{AA} = X_L + X_S // X_1 \\ Z_{BB} = X_S // X_1 \\ Z_{AB} = Z_{BA} = \frac{X_S // X_1}{X_L + X_S // X_1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Z_{AA} 为图1中短路点左侧系统自阻抗; Z_{BB} 为图1中短路点右侧系统自阻抗; $Z_{AB} = Z_{BA}$ 为图1中短路点左右两侧互阻抗。

3) 计算恒定激励产生的短路电流 I''_{F1} , 并计算该短路电流影响下的 A、B 节点电压变化量 ΔU_{1A} 、 ΔU_{1B} 。

$$I''_{F1} = -\frac{U_B}{Z_{BB}} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} \\ Z_{BA} & Z_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I''_{F1A} \\ I''_{F1B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta U_{1A} \\ \Delta U_{1B} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: 节点 A 短路电流 $I''_{F1A} = 0$; 节点 B 短路电流 $I''_{F1B} = I''_{F1}$ 。

4) 计算可变电流量源产生的短路电流 $I_{F2}^{(1)}$ 。先修正可变电流量源机端电压 $U_A^{(1)}$, 计算可变电流量源的输出电流变化量 $\Delta I_S^{(1)}$, 再计算可变电流量源输出电流变化量引起的短路电流 $I_{F2}^{(1)}$ 。

$$U_A^{(1)} = U_A - \Delta U_{1A} \quad (4)$$

$$\Delta I_S^{(1)} = I_S(U_A^{(1)}) - I_S(U_A) \quad (5)$$

$$I_{F2}^{(1)} = \frac{\Delta I_S^{(1)} Z_{AB}}{Z_{BB}} \quad (6)$$

5) 修正计算可变电流量源机端电压。根据可变电流量源的输出电流变化量 $\Delta I_S^{(1)}$ 计算可变电流量源机端电压变化量 $\Delta U_{2A}^{(1)}$, 再计算可变电流量源机端电压 $U_A^{(1)}$ 。

$$\Delta U_{2A}^{(1)} = (I_{F2}^{(1)} - I_S) Z_{AB} \quad (7)$$

$$U_A^{(1)} = U_A - \Delta U_{1A} + \Delta U_{2A}^{(1)} \quad (8)$$

6) 迭代计算。依次修正计算可变电流量源的输出电流变化量 $\Delta I_S^{(2)}$ 及其引起的短路电流 $I_{F2}^{(2)}$ 、可变电流量源机端电压变化量 $\Delta U_{2A}^{(2)}$ 及机端电压 $U_A^{(2)}$ 。

$$\Delta I_S^{(2)} = I_S(U_A^{(1)}) - I_S(U_A) \quad (9)$$

$$I_{F2}^{(2)} = \frac{\Delta I_S^{(2)} Z_{AB}}{Z_{BB}} \quad (10)$$

$$\Delta U_{2A}^{(2)} = (I_{F2}^{(2)} - I_{F2}^{(1)}) Z_{AB} \quad (11)$$

$$U_A^{(2)} = U_A - \Delta U_{1A} + \Delta U_{2A}^{(2)} \quad (12)$$

7) 迭代计算结束。当 $I_{F2}^{(n)} - I_{F2}^{(n-1)} \leq \varepsilon$ 时, 计算结束。

由上述可变电流量源计算步骤可知, 迭代计算的目的是精确计算故障后可变电流量源输出的电流。如果已估算出故障后可变电流量源输出的电流, 即可建立故障后可变电流量源提供短路电流的快速估算模型, 如式 (13) 所示。

$$I''_{F2} = \frac{I_{qFc} Z_{AB}}{Z_{BB}} \quad (13)$$

式中, I_{qFc} 为故障后可变电流量源输出电流的估算值。

新能源在故障期间输出的无功电流计算公式^[19]如式 (14) 所示。

$$\begin{cases} 0 & U_{FG} > 0.9 \\ K_q(0.9 - U_{FG}) I_N & U_{FG} \leq 0.9 \\ I_{qmax} & K_q(0.9 - U_{FG}) I_N > I_{qmax} \end{cases} \quad (14)$$

式中: U_{FG} 为发电机端电压, 标么值; I_{qmax} 为无功电流限幅, 取值范围 1.1~1.3; I_N 为发电机额定电流, 以本机为基准时取值 1.0; K_q 为无功电流倍数, 一般取值 1.5。

2 新能源最大接入容量分析

目前新能源接入时先升压至 10 kV, 再基于辐射型汇集网络采用逐级汇集的方式接入最高电压等级汇集站。这里考虑接入新能源全部为双馈风机以及新能源全部为全尺寸换流器接入两种情况。假如新能源接入 750 kV 汇集站, 基于汇集系统的整体短路阻抗和 750 kV 汇集站主变压器容量计算新能源接入后对短路电流的贡献值。

对于接入新能源全部为双馈风机的情况, 短路阻抗 Z_H 计算为

$$Z_H = Z_T + Z_G \cdot \frac{S_T}{S_{DF}} \quad (15)$$

式中: Z_T 为汇集网络短路阻抗; Z_G 为双馈风机的短路阻抗; S_{DF} 为双馈风机的装机容量; S_T 为 750 kV 汇集站主变压器容量。

对于新能源全部为全尺寸换流器接入的直驱风机或光伏的情况, 短路阻抗为汇集网络短路阻抗 Z_T 。

汇集网络短路阻抗 Z_T 根据汇集网络采用以下其中一种计算方式:

$$Z_T = Z_{750} + \frac{Z_{330}}{K_{330}} + \frac{Z_{110}}{K_{110}} + \frac{Z_{35}}{K_{35}} + \frac{Z_{10}}{K_{10}} \quad (16)$$

$$Z_T = Z_{750} + \frac{Z_{330}}{K_{330}} + \frac{Z_{110}}{K_{110}} + \frac{Z_{35}}{K_{35}} \quad (17)$$

$$Z_T = Z_{750} + \frac{Z_{330}}{K_{330}} + \frac{Z_{110}}{K_{110}} + \frac{Z_{10}}{K_{10}} \quad (18)$$

式中: Z_{750} 、 Z_{330} 、 Z_{110} 、 Z_{35} 、 Z_{10} 分别为 750 kV、330 kV、110 kV、35 kV、10 kV 变压器等效内阻抗; K_{750} 、 K_{330} 、 K_{110} 、 K_{35} 、 K_{10} 分别为 750 kV、330 kV、110 kV、35 kV、10 kV 变压器实际额定电压比。

基于上述汇集系统的整体短路阻抗,计算新能源接入后对短路电流的贡献值。对于接入新能源全部为双馈风机的情况,新能源接入后对短路电流的贡献值为

$$I''_{DF} = \frac{1}{Z_H} \cdot \frac{S_T}{\sqrt{3}U_n} \quad (19)$$

式中: I''_{DF} 为新能源接入后对短路电流的贡献值; U_n 为主变压器额定电压。

对于新能源全部为全尺寸换流器接入的直驱风机或光伏的情况,新能源接入后对短路电流的贡献值为:

$$I_{qFC} = \begin{cases} 0 & U_{IG} > 0.9 \\ K_q(0.9 - U_{IG})I_N & U_{IG} \leq 0.9 \\ I_{qmax} & K_q(0.9 - U_{IG})I_N > I_{qmax} \end{cases} \quad (20)$$

$$I'_{qFC} = I_{qFC} \cdot \frac{S_T}{\sqrt{3}U_n} \quad (21)$$

式中: I_{qFC} 为新能源接入后对短路电流的贡献值,标么值; I'_{qFC} 为 I_{qFC} 的有名值。

进一步的,基于所计算的对短路电流的贡献值计算新能源最大接入容量。对于接入新能源全部为双馈风机的情况,新能源最大接入容量为

$$P_{maxDF} = 0.9 S_{DF}(I_{SC} - I''_{k0})/I''_{DF} \quad (22)$$

式中: P_{maxDF} 为双馈风机最大接入容量; I_{SC} 为断路器遮断容量; I''_{k0} 为新能源接入前 750 kV 汇集站短路电流。

对于新能源全部为全尺寸换流器接入的直驱风机或光伏的情况,新能源最大接入容量为

$$P_{maxFC} = 0.9 S_{DF}(I_{SC} - I''_{k0})/I'_{qFC} \quad (23)$$

式中, P_{maxFC} 为直驱风机或光伏最大接入容量。

3 短路电流约束的新能源最大接入容量实例分析

3.1 短路电流实例分析

下面搭建了小系统算例,来验证所提出的任一节点短路电流快速估算方法的有效性。小系统仿真算例如图 2 所示。

考虑基准容量 S_B 为 100 MVA,小系统变压器以及线路的参数如表 1 和表 2 所示。此外火电次暂态电抗取值 0.2。

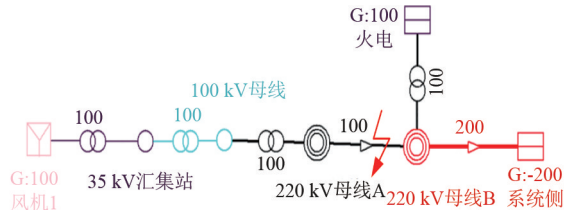


图 2 新能源风机小系统算例

表 1 小系统新建变压器参数

变压器	容量/MVA	漏抗百分数/%	漏抗/(pu)
35 kV 厢式变压器	100	7	0.07
110 kV 升压变压器	100	10	0.10
220 kV 变压器	100	12	0.12

表 2 小系统新建线路参数

线路参数	长度/km	阻抗/(pu)
35 kV 输电线	10	0.388
110 kV 汇集线	20	0.061
220 母线 A—母线 B	30	0.070
母线 B—系统侧	30	0.070

当系统接入新能源为电流源设备时,将电路等效为图 2 模型,形成阻抗矩阵计算远端电压。

$$\begin{aligned} & 1) \text{形成系统阻抗矩阵。两节点系统矩阵 } Z: \\ Z_{AA} &= 0.07 + 0.388 + 0.1 + 0.061 + 0.12 + 0.07 + \\ & (0.07 // (0.12 + 0.2)) = 0.866 \quad (24) \end{aligned}$$

$$Z_{BB} = 0.07 // (0.12 + 0.2) = 0.057 \quad (25)$$

$$Z_{AB} = 0.057 \times 0.866 = 0.066 \quad (26)$$

2) 计算恒定激励产生的短路电流。其中 $U_B = 1$, 则恒定激励产生的短路电流 I''_{F1} 和节点电压变化量 ΔU_1 为:

$$I''_{F1} = - (1/0.057) = -17.41 \quad (27)$$

$$\Delta U_1 = 0.066 \times (-17.41) = -1.15 \quad (28)$$

3) 计算可变电流量产生的短路电流。取故障前新能源机端电压 1 pu, 满出力时 I_s 为 1 pu, 故障时刻机端电压 U_A 跌落至 0, 可得修正可变电流量机端电压 $U_{(1)A}$ 和输出电流变化量 $\Delta I_{(1)S}$ 以及可变电流量输出电流变化量引起的短路电流 $I_{(1)F2}$ 。

$$U_{(1)A} = 0 - (-1.15) = 1.15 \quad (29)$$

$$\Delta I_{(1)S} = 1 \times (1.15 - 0) = 1.15 \quad (30)$$

$$I_{(1)F2} = 1.15 \times 0.066 / 0.057 = 1.33 \quad (31)$$

4) 修正计算可变电流量机端电压。根据可变电流量产生的短路电流计算可变电流量机端电压变化量 $\Delta U_{(1)2}$, 进而计算可变电流量机端电压 $\Delta U_{(1)A}$ 。

$$\Delta U_{(1)2} = (1.33 - 1) \times 0.066 = 0.022 \quad (32)$$

$$\Delta U_{(1)A} = 0 - (-1.15) + 0.022 = 1.17 \quad (33)$$

5) 迭代计算。修正计算可变电流量输出电流变化量引起的短路电流 $I_{(2)F2}$ 、 $I_{(3)F2}$ 以及可变电流量机端电压变化量 $\Delta U_{(2)A}$ 、 $\Delta U_{(3)A}$ 。

$$I_{(2)F2} = 1.36 \quad (34)$$
$$\Delta U_{(2)A} = 1.18 \quad (35)$$
$$I_{(3)F2} = 1.36 \quad (36)$$
$$\Delta U_{(3)A} = 1.18 \quad (37)$$

转换成短路电流计算值为

$$I = I_1 I_B = I_1 \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B} = \frac{1.36 \times 100 \text{ MVA}}{1.732 \times 230 \text{ kV}} = 0.34 \text{ kA} \quad (38)$$

迭代计算的目的是精确计算故障后可变电流量输出的电流。经迭代法计算,当接入系统为容量 100 MW 的新能源时,提供 220 kV 厂站短路电流约为 0.34 kA。此外根据故障后可变电流量提供短路电流的快速估算模型见式(13),计算短路电流为 0.33 kA,系统仿真软件计算短路电流为 0.34 kA,计算结果如表 3 所示。由此证明了所提短路电流计算方法的有效性。

表 3 100 MW 新能源投运前后短路电流 单位:kA

电压等级	风机未投	风机投入	增加量	计算值
220 kV	22.20	22.52	0.34	0.33
110 kV	0	0.93	0.93	0.92
35 kV	0	3.04	3.04	3.01

3.2 新能源最大接入容量实例分析

以华北电网为实际算例来验证所提基于短路电流约束的新能源最大接入容量实用化计算方法的有效性。张北地区风光资源丰富,张南站是向北京和门头沟地区供电的重要枢纽厂站,该站汇集了新能源(坝上新能源汇集站)和火电装机(沙岭子火电),因此 500 kV 线路出线较多,其 500 kV 母线三相短路电流为 59.32 kA。张南站近区新能源主要通过厢式变压器以及升压变压器将电力通过汇集线路输送至 220 kV 站,打捆通过双回 220 kV 线路接至 500 kV 站,通过 500 kV 主变压器输送至主网。新能源接入系统接线如图 3 所示,参数如表 4、表 5 所示。

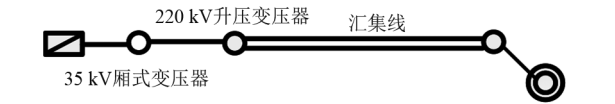


图 3 新能源接入系统接线

表 4 新能源接入系统变压器参数

变压器	容量/MVA	漏抗百分数/%	漏抗/(pu)
35 kV 厢式变压器	100	7	0.070
220 kV 升压变压器	2×240	12	0.050
500 kV 变压器	4×750	18	0.024

表 5 新能源接入系统线路参数

线路参数	长度/km	阻抗/(pu)
35 kV 输电线	15	0.50
220 kV 汇集线	40	0.04

在近区新增 1000 MW 风电装机容量,单台机组容量为 100 MW,机端到短路点的等效阻抗 X 为 0.621。新能源接入前短路电流为 59.32 kA,接入后为 60.13 kA,增加了 0.81 kA。

根据式(20),可得出故障期间提供的短路电流如式(39)所示。

$$I_{qFC} = K_q (0.9 - I_{qFC} X) I_N \quad (39)$$

由式(39)可计算出张南站 500 kV 母线提供的短路电流 I_{500} 为

$$I_{500} = 10 \times \frac{0.9}{1/(K_q I_n) + X} \times \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B} =$$
$$10 \times \frac{0.9}{1/(1 \times 1.5) + 0.621} \times \frac{100 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 525 \text{ kV}} \quad (40)$$
$$= 0.77 \text{ kA}$$

计算所得新增短路电流为 0.77 kV,与实际值相对误差为 4.9%,由此可证明所提方法的有效性。

根据公式(41)计算接入新能源极限。假设风电接入前 500 kV 短路电流水平为 I''_{k0} ,断路器遮断容量为 I_{SC} ,新能源未接入前张南站 500 kV 母线三相短路电流为 59.32 kA,按照 1000 MW 提供约 0.77 kA 短路电流计算,此时张南站最大新能源接入容量为

$$P_{\max FC} = 0.9 \times S_{DF} \times \frac{(I_{SC} - I''_{k0})}{I'_{qFC}} =$$
$$0.9 \times 1000 \times \frac{(63 - 59.32)}{0.77} \approx 4300 \text{ MW} \quad (41)$$

式中,0.9 为有功功率系数,1000 MVA 为视在功率,1000×0.9 为有功功率。

在张南站短路电流为 59.32 kA 的基础上,当在张南站近区接入 4300 MW 容量的新能源,仿真计算张南站 500 kV 母线短路电流为 62.89 kA,临近短路器遮断容量。

4 结 论

随着并网新能源规模的迅猛增加,特别是集中式接入的新能源对并网点短路电流的贡献越来越大,受限于短路电流水平,集中并网点所能接入的新能源最大装机容量已成为各方关注的焦点。所提基于短路电流约束的汇集系统新能源最大接入容量实用化计算方法,可简单快速得出集中并网点可接入新能源最大装机规模。以华北电网张南站为实际案例计算新能源最大接入容量,并使用仿真软件计算验证了所提方法的准确性,对于指导电网规划具有重要的研究意义。

参考文献

[1] 陈国平,董昱,梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17):5493-5506.

[2] MULJADI E, SAMAAN N, GEVORGIAN V, et al. Short circuit current contribution for different wind turbine generator types [C]//IEEE PES General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, MN, USA. IEEE, 2010.

[3] 刑鲁华,陈青,吴长静,等. 含双馈风电机组的电力系统短路电流实用计算方法[J]. 电网技术,2013, 37(4):1121-1127.

[4] 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 and Energy Systems, 2024, 155:109622.

[5] LI J, ZHANG X P, YAO W, et al. Study on the calculation methods for short-circuit current DC component [C]//2022 International Conference on Computer Engineering and Artificial Intelligence (ICCEAI), July 22-24, 2022, Shijiazhuang, China. IEEE, 2022:378-382.

[6] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25):1-9.

[7] BERIZZI A, SILVESTRI A, ZANINELLI D, et al. Short-circuit current calculations for DC systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(5): 990-997.

[8] 王志群,朱守真,周双喜,等. 分布式发电接入位置和注入容量限制的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(1):53-58.

[9] DUBEY A, SANTOSO S. On estimation and sensitivity analysis of distribution circuit's photovoltaic hosting

capacity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4):2779-2789.

[10] WANG S X, DONG Y C, WU L, et al. Interval overvoltage risk based PV hosting capacity evaluation considering PV and load uncertainties [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3):2709-2721.

[11] RAVIKUMARPANDI V, ZEINELDIN H H, XIAO W D, et al. Optimal penetration levels for inverter-based distributed generation considering harmonic limits [J]. Electric Power Systems Research, 2013, 97:68-75.

[12] 吴素农,于金镒,杨为群,等. 配电网分布式电源最大并网容量的机会约束评估模型及其转化方法[J]. 电网技术, 2018, 42(11):3691-3697.

[13] 丁琦欣,覃洪培,万灿,等. 基于机会约束规划的配电网分布式光伏承载能力评估[J]. 东北电力大学学报, 2022, 42(6):28-38.

[14] 翁毅选,程仞俐,等. 计及电压波动约束的光伏电源最大可接入容量分析[J]. 智慧电力, 2018, 46(11): 28-32.

[15] 尤毅,余南华,张晓平,等. 主动配电网分布式能源分区消纳实时协调控制[J]. 南方电网技术, 2015, 9(8): 71-76.

[16] 黄河,朱磊,高松,等. 提升分布式电源消纳的配网快速遍历重构方法[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 166-172.

[17] 于昊正,赵寒杰,李科,等. 计及需求响应的分布式光伏集群承载能力评估[J]. 电力建设, 2023, 44(2): 122-131.

[18] LI H, LU Z X, QIAO Y, et al. The flexibility test system for studies of variable renewable energy resources [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1526-1536.

[19] 杨杉,同向前. 含低电压穿越型分布式电源配电网的短路电流计算方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 93-99.

作者简介:

潘 艳(1986),女,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统规划;

李付强(1977),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向为电力系统规划;

黄明辉(1996),男,硕士,助理工程师,研究方向为电力系统规划;

赵 伟(1976),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统规划;

张 野(1998),男,硕士,助理工程师,研究方向为电力系统规划;

张文朝(1978),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为电力系统规划。