

考虑新能源出力不确定性的可用输电能力在线评估方法

鲍颜红¹,张金龙¹,江叶峰²,徐伟¹,毕明德²,杨君军¹

(1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司),江苏 南京 211106;

2. 国网江苏电力公司调度控制中心,江苏 南京 210024)

摘要:准确、高效地在线计算新能源送出断面的可用输电能力(ATC)对于在维持系统安全稳定运行的前提下提高新能源消纳能力具有重要意义。提出一种考虑新能源出力不确定性的ATC在线评估方法,在各新能源电厂出力区间概率的基础上进行概率潮流计算,获得关键输电断面的功率区间及其概率;评估断面功率区间故障后新能源机组脱网和受端负荷损失情况,获得运行风险;以收益与运行风险差值最大化为目标获得断面的ATC值。某实际电网算例验证了所提方法的有效性。

关键词:新能源出力;可用输电能力;在线评估;安全稳定;运行风险

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202004013

0 引言

风电、光伏等新型清洁能源的大力发展可以减少温室气体的排放,节约化石能源的消耗^[1-2],但由于新能源出力具有不确定性和间歇性,其大规模并网给电网安全运行带来了巨大的挑战^[3]。就中国而言,新能源发电大规模、高集中开发以及远距离、高电压输送,出现了较为严重的弃风、弃光问题,联络线外送能力成为影响新能源消纳的关键因素之一^[4]。可用输电能力ATC(Available Transfer Capability)^[5]是衡量电力系统区域间可进一步可靠传输电能的能力,准确、高效地计算ATC对于维持系统的安全稳定运行以及保证电能交易的顺利完成具有重要意义,也有助于进一步提高新能源消纳能力。

含大规模新能源厂站电力系统的不确定性因素大幅增加,新能源厂站出力的波动性和间歇性导致输出功率快速变化,是否准确合理地考虑这些不确定因素决定了ATC计算的准确性与可靠性。概率性的评估方法是处理不确定因素的常用方法,其计算过程大致分为系统状态的选取和该状态下的ATC计算2步,进而可以求取ATC的均值、方差、概率分布函数等统计特征,但这类方法由于计算时间太长而难以实现在线应用^[6-8]。相关文献提出快速计算含风电场概率ATC的方法,文献[9]计及输入随机变量相关性的影响,文献[10]在ATC对节点注入功率波动灵敏度快速估算的基础上采用分层聚类算法划分蒙特卡罗抽样样本。但上述方法仅能考虑静态

安全约束。文献[11-12]采用连续潮流结合静态电压稳定域的方法快速计算最大输电能力,但该方法实现较为复杂。此外,概率性方法虽然能够覆盖概率主体空间,但容易忽略小概率高风险事件,而风险性方法进一步通过未覆盖区域的风险残值评估,自适应确定概率主体空间的范围,能够弥补概率性方法的缺陷^[13]。文献[14]通过建立ATC的风险效益模型,提出以追求综合效益最大化为目标的ATC决策方法。

目前实际调度运行中大多采用确定性的方法按照安全稳定保守原则计算ATC。采用最优潮流模型^[15-16]的ATC计算由于结果过于乐观而无法满足安全稳定约束的要求,文献[17]采用的合理安全原则使计算结论对生产运行具有较好的指导意义。近年来,在线动态安全评估DSA(online Dynamic Security Assessment)系统的广泛建设使得在线ATC计算成为可能,基于当前运行方式在线计算ATC提高了结果的准确性,但计算过程中的潮流方式调整仍然是基于保守原则,这限制了区域间传输电能的能力。

本文提出一种考虑新能源出力不确定性的ATC在线评估方法。首先根据短期风力、光照强度预测结果获得各新能源电厂出力区间概率,并进行概率潮流计算获得关键输电断面的功率区间及其概率;然后逐步增加新能源机组出力至某一个断面功率区间,再评估该断面功率区间下故障后新能源机组脱网和受端负荷损失情况,获得运行风险。如果在某一断面最大传输功率下的运行风险增加速率大于断面功率提升获得的收益增加速率,即可获得该断面的ATC。该方法以收益与风险差值最大化为目标,改善了目前在线ATC计算结果过于保守的问题,有助于提高新能源消纳能力,某实际电网的算例验证了该方法的有效性。

收稿日期:2019-08-23;修回日期:2020-02-17

基金项目:国家电网公司科技项目(大电网调度运行关键指标及实时评价方法研究)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(Research on Key Indexes and Real-time Evaluation Method of Large Power Grid Dispatching Operation)

1 计算模型

1.1 在线ATC计算

北美电力系统可靠性委员会(NERC)对ATC的定义是:在现有输电合同的基础上,输电网络中剩余的用于商业用途的传输容量。本文基于当前确定运行方式在线计算ATC,且计算过程中考虑新能源厂站出力的不确定性,因此不再考虑传输可靠性裕度TRM(Transmission Reliability Margin)和容量效益裕度CBM(Capability Benefit Margin)的影响,ATC计算求取的是系统最大输电能力减去当前传输的功率。

对于大规模新能源电力送出问题,可以将其分为新能源电力送端系统和受电端负荷中心系统,两者之间通过由交直流联络线构成的联络断面相连。系统最大输电能力取决于新能源电力送出能力、负荷中心需求和联络断面的输电能力三者的最小值,本文主要讨论由断面传输限制决定的最大输电能力。联络断面传输能力的限制因素主要包括静态和暂态安全稳定约束,暂态安全稳定问题主要包括故障造成的送电端暂态功角失稳、暂态电压和频率问题引发的风机连锁脱网以及受电端的暂态电压和频率问题。

对于联络断面传输能力而言,其断面达到功率极限时对应的潮流调整方式不同,计算得到的最大输电能力也不一致。文献[18]指出断面功率极限为最大值和最小值构成的区间,并基于扩展等面积准则(EEAC)量化分析方法获得的预想故障下安全稳定裕度、模式和元件的参与因子,结合节点功率对输电断面功率的灵敏度计算发电机和负荷对断面功率极限的影响因子,通过发电机、负荷功率调整计算暂态稳定功率极限的最大值和最小值。目前实际运行中一般按照区间最小值确定最大输电能力,计算结果偏于保守,不利于提高新能源消纳能力;理论上计算得到的功率极限区间最大值无法保证安全稳定要求,难以进行实际应用。

目前,考虑不确定性的在线ATC计算主要为日内电力交易现货市场以及日内和实时调度计划制定提供断面限额,也可以帮助调度运行人员掌握电网运行趋势,时间尺度一般为1~4 h。系统中未来一段时间常规机组的出力变化情况可以由实时和日内调度计划获得,而负荷变化情况也可由短期负荷预测得到,因此预测这些因素引起的潮流变化情况相对准确。但由短期风力、光照强度预测结果仅能获得各新能源厂站出力区间概率,难以获得准确的出力值。如果按照保守原则计算的断面最大输电能力大于新能源最大预测出力对应的断面功率,则由断面传输限制决定的最大输电能力即为按照保守原则所

得计算值;否则最大输电能力在极限功率区间最大、最小值之间,其分布概率主要由新能源厂站出力区间概率决定。

1.2 综合效益模型

采用与文献[14]相同的综合效益模型,综合效益函数 $f_{sy}(P_T)$ 可以表示为收益函数与风险函数的差值,即:

$$f_{sy}(P_T) = f_{bf}(P_T) - K_c f_{rf}(P_T) \quad (1)$$

其中, $f_{bf}(P_T)$ 为与断面最大传输功率 P_T 相关的收益函数; $f_{rf}(P_T)$ 为风险函数,运行风险可通过评估该断面最大传输功率下故障后新能源机组脱网和受端负荷损失情况得到; K_c 为折算系数。

综合效益函数最大时对应的 P_T 即为最优断面最大传输功率,有:

$$\frac{df_{bf}(P_T)}{dP_T} = K_c \frac{df_{rf}(P_T)}{dP_T} \quad (2)$$

考虑到函数 $f_{rf}(P_T)$ 的非线性,将式(2)差分化后转化为:

$$f_{bf}(P_T) - f_{bf}(P_{T0}) = K_c (f_{rf}(P_T) - f_{rf}(P_{T0})) \quad (3)$$

其中, P_{T0} 为断面功率极限区间下限值。

在按保守原则计算的断面功率极限区间下限 P_{T0} 的基础上,按照综合效益最大化原则,当在某一断面最大传输功率下运行风险增量等于断面功率提升获得的收益增量时,即得到该断面的最大输电能力。考虑到调度运行相关规程要求,断面最大输电能力不得超过断面功率极限区间上限值。

2 断面功率区间概率

目前,通过考虑新能源出力时序特性的短期新能源功率预测方法可以得到若干可能的出力场景和各场景的新能源出力概率^[19]。在快速解耦潮流模型或灵敏度分析技术的基础上,采用半不变量法的概率潮流计算^[20]可以获得各状态变量的概率分布函数,且计算速度可以满足在线应用要求。通过各状态变量越限概率和产生后果的严重程度等风险指标全面评估系统风险^[21]。然而,上述方法仅能对系统的静态安全风险进行评估,对于暂态安全稳定的风险评估需要确定运行方式数据并进行时域仿真,如系统含风电场数目为 N_w ,每座风电场预估的出力区间数目为 K_x ,则不确定场景数目为 $K_x^{N_w}$,即使只对每个不确定场景选择一个点进行暂态稳定分析计算,其计算量也无法满足在线风险评估的要求。

设当前时刻为 t_h ,可以由短期风力、光照强度预测结果获得下一时刻 t_{h+1} 各新能源电厂可能出力区间的概率 $C_{h,i,j}$ 。令 $[P_{w,1}^{t_{h+1}}, \bar{P}_{w,1}^{t_{h+1}}]$ 、 $[P_{w,2}^{t_{h+1}}, \bar{P}_{w,2}^{t_{h+1}}]$ 、 $\dots$ 、 $[P_{w,K_x}^{t_{h+1}}, \bar{P}_{w,K_x}^{t_{h+1}}]$ 表示预测的新能源电厂 i 在 t_{h+1} 时刻的

可能出力区间,共有 K_x 个区间,其中 $[P_{w,j}^{t_{h+1}}, \bar{P}_{w,j}^{t_{h+1}}]$ 为第 j 个区间, $P_{w,j}^{t_{h+1}}, \bar{P}_{w,j}^{t_{h+1}}$ 分别为第 j 个区间出力下限值和出力上限值,第 j 个区间出力上限值与第 $j+1$ 个区间出力下限值相等,则新能源电厂 i 出力在区间 $[P_{w,j}^{t_{h+1}}, \bar{P}_{w,j}^{t_{h+1}}]$ 的概率为 $C_{h,i,j}$,设 $P_{w,j}^{t_{h+1}} = (P_{w,j}^{t_{h+1}} + \bar{P}_{w,j}^{t_{h+1}})/2$ 为该区间上、下限的出力中值,则可认为新能源电厂 i 出力为 $P_{w,j}^{t_{h+1}}$ 的概率为 $C_{h,i,j}$ 。

基于相关新能源电厂的断面功率灵敏度系数以及出力区间概率进行概率潮流计算,即可以获得联络输电断面的可能功率区间及其概率 $[(\Delta P_{L,1}, C_{h,1}), (\Delta P_{L,2}, C_{h,2}), \dots, (\Delta P_{L,M}, C_{h,M})]$,其中, $\Delta P_{L,i}, C_{h,i}$ 分别为第 i 个断面功率区间中值和功率区间中值概率, M 为输电断面功率区间总数。对应的输电断面功率区间为 $[P_{L,i}, \bar{P}_{L,i}]$,其中 $P_{L,i}, \bar{P}_{L,i}$ 分别为区间功率下限值和功率上限值。

文献[18]定义了发电机和负荷对断面功率极限的影响因子,根据EEAC提供的主导互补群机组参与因子大小计算输电断面相关新能源电厂的功率极限影响因子。分别采用式(4)和式(5)计算相关新能源电厂母线与临界群和余下群中所有发电机母线之间的综合电气距离 $X_{S,i}, X_{A,i}$ 。

$$X_{S,i} = \sum_{j=1}^{N_S} (x_{ij}/a_j)/N_S \quad (4)$$

$$X_{A,i} = \sum_{j=1}^{N_A} (x_{ij}/|a_j|)/N_A \quad (5)$$

其中, a_j 为EEAC提供的发电机 j 暂态功角稳定参与因子; x_{ij} 为发电机 j 母线与相关新能源电厂母线 i 之间的电气距离; N_S 为临界群中发电机台数; N_A 为余下群中发电机台数。

如果 $X_{A,i} > X_{S,i} + \Delta X$,其中 ΔX 为电气距离门槛值,则判断新能源电厂 i 属于临界群;如果 $X_{S,i} > X_{A,i} + \Delta X$,则判断新能源电厂 i 属于余下群。在临界群和余下群中分别取 $X_{S,i}$ 和 $X_{A,i}$ 的倒数,计算获得相关新能源电厂对功率极限的影响因子,并按影响因子从大到小的顺序对新能源电厂进行排序。

首先分别将新能源电力送端系统中常规机组和负荷功率调整到超短期发电计划和负荷预测值,然后使相关新能源电厂按照功率极限影响因子由大到小的顺序增加出力,直至输电断面功率到达某一断面功率区间中值,同时增加受端系统的负荷功率,基于调整后的运行方式即可对预想故障进行暂态稳定评估。虽然按照功率极限影响因子由大到小的顺序进行调整相对保守,但可满足实际调度运行的安全稳定要求。

3 断面最大输电能力

输电断面功率达到第 i 个断面功率区间中值,基于调整后的运行方式对故障 K 进行安全稳定风险评估。按照故障后损失负荷总量和新能源机组脱网量评估故障的严重度 $S_{e,K,i}$ 。在故障时域仿真计算中考虑第二道防线安控装置和第三道防线低频低压减载、解列装置动作建模,统计故障直接引发负荷损失和第二、三道防线安全自动装置切除负荷损失;同时考虑新能源机组频率和电压保护动作切除的机组总量,将负荷总量和新能源机组脱网量分别乘以对应的代价系数后相加求和作为故障的严重度指标,由此获得该断面功率区间的运行风险如式(6)所示。

$$I_{r,i} = \left(\sum_{K=1}^{N_e} P_{e,K} S_{e,K,i} \right) C_{h,i} \quad (6)$$

其中, N_e 为预想故障总数; $P_{e,K}$ 为预想故障 K 发生的概率。

当以第 i 个断面功率区间中值作为断面最大输电功率时,运行风险为小于等于第 i 个断面功率区间中值的各断面功率区间的风险累加:

$$f_{rt}(\Delta P_{L,i}) = \sum_{j=1}^i I_{r,j} \quad (7)$$

式中,计算 $I_{r,i}$ 时的功率区间概率为所有大于等于第 i 个断面功率区间的各断面功率区间概率和。

当计算得到的运行风险满足式(3)时,则第 i 个断面功率区间中值即为该断面的最大输电能力,最大输电能力减去当前传输的功率即为ATC计算值。其中断面最大输电能力收益函数的处理方法与上述方法类似,运行于某一断面功率区间时的收益增量考虑为断面功率增量的线性函数。

4 在线并行计算

ATC的在线评估对计算时间要求较严格,目前在线动态安全分析系统的计算周期一般为15 min,因此需要在该时间间隔内完成评估计算。

目前通常基于集群计算平台采用并行计算的方式提高计算速度。对于上文所述的 M 个输电断面功率区间和 N_e 个预想故障,可以形成 MN_e 个计算方案下发至并行计算平台的计算节点,每个计算节点并行进行暂态时域仿真和风险评估计算,然后对计算结果进行综合分析获得断面的ATC,计算速度可以满足ATC在线评估要求。

5 算例仿真验证

以西北电网2019年6月3日10:15断面时刻数据为例,DSA系统考核的敦鱼断面如图1所示,其初始潮流为2442.08 MW,基于文献[18]所提方法识别的暂态稳定功率极限范围为4300~5400 MW,受限

区间增加后,在线ATC计算耗时可控制在2 min以内(并行计算1~3轮)。

6 结语

准确、高效地在线计算新能源送出断面的ATC,对于在维持系统安全稳定运行的前提下提高新能源消纳能力具有重要意义。本文提出的考虑新能源出力不确定性的ATC在线评估方法,在断面功率极限区间计算的基础上,以收益与运行风险差值最大化为目标,改善了目前在线ATC计算结果过于保守的问题,有助于提高新能源消纳能力。后续的研究工作包括进一步提高计算的准确性和计算效率。

参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国2050高比例可再生能源发展情景暨路径研究[R/OL]. [2015-04-20]. <http://www.echina.org/Reports-zh/china-2050-high-renewable-energy-penetration-scenario-and-roadmap-study-zh>.
- [2] 国家电网有限公司. 促进新能源发展白皮书2018[R/OL]. [2018-04-08]. <http://www.doc88.com/p-9744812038787.html>.
- [3] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5029-5040.
XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [4] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):1-9.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.
- [5] Transmission Transfer Capability Task Force. Available transfer capability definitions and determination[R]. Princeton, New Jersey, USA: North American Electric Reliability Council, 1996.
- [6] 李庚银,高亚静,周明. 可用输电能力评估的序贯蒙特卡罗仿真法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(25):74-79.
LI Gengyin, GAO Yajing, ZHOU Ming. Sequential Monte Carlo simulation approach for assessment of available transfer capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 74-79.
- [7] 周明,冉瑞江,李庚银. 风电并网系统可用输电能力的评估[J]. 中国电机工程学报,2010,30(22):14-21.
ZHOU Ming, RAN Ruijiang, LI Gengyin. Assessment on available transfer capability of wind farm incorporated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 14-21.
- [8] 郑雅楠,周明,李庚银. 基于信息熵的可用输电能力枚举评估方法[J]. 电网技术,2011,35(11):107-113.
ZHENG Yanan, ZHOU Ming, LI Gengyin. An information entropy based contingency enumeration approach for available transfer capability assessment[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 107-113.
- [9] 罗钢,石东源,蔡德福,等. 计及相关性的含风电场电力系统概率可用输电能力快速计算[J]. 中国电机工程学报,2014,34(7):1024-1032.
LUO Gang, SHI Dongyuan, CAI Defu, et al. Fast calculation of probabilistic available transfer capability considering correlation in wind power integrated systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1024-1032.
- [10] 李中成,张步涵,段瑶,等. 含大规模风电场的电力系统概率可用输电能力快速计算[J]. 中国电机工程学报,2014,34(4):505-513.
LI Zhongcheng, ZHANG Buhuan, DUAN Yao, et al. Fast calculation of probabilistic available transfer capability in power systems including large-scale wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 505-513.
- [11] 王成山,王兴刚,孙玮. 含大型风电场的电力系统概率最大输电能力快速计算[J]. 中国电机工程学报,2008,28(10):56-62.
WANG Chengshan, WANG Xinggang, SUN Wei. Fast calculation and analysis of probabilistic total transfer capability in power system including large-scale wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 56-62.
- [12] 王成山,王兴刚. 考虑静态电压稳定约束及负荷和发电机出力不确定性因素的概率最大输电能力快速计算[J]. 中国电机工程学报,2006,26(16):46-51.
WANG Chengshan, WANG Xinggang. Fast calculation of probabilistic total transfer capability considering static voltage stability constraints and the uncertainties of load and generator output[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 46-51.
- [13] 吴俊,薛禹胜,舒印彪,等. 大规模可再生能源接入下的电力系统充裕性优化(一)旋转级备用的优化[J]. 电力系统自动化,2019,43(8):101-110.
WU Jun, XUE Yusheng, SHU Yinbiao, et al. Adequacy optimization for a large-scale renewable energy integrated power system part one spinning-grade reserve optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 101-110.
- [14] 王俊,蔡兴国,季峰,等. 考虑新能源发电不确定性的可用输电能力风险效益评估[J]. 电力系统自动化,2012,36(14):108-112.
WANG Jun, CAI Xingguo, JI Feng, et al. Evaluation of risk and benefit of ATC relating to uncertainty of renewable energy power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 108-112.
- [15] 汪峰,白晓民. 基于最优潮流方法的传输容量计算研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(11):35-40.
WANG Feng, BAI Xiaomin. OPF based transfer capability calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 35-40.
- [16] 潘雄,徐国禹. 基于最优潮流并计及静态电压稳定性约束的区域间可用输电能力计算[J]. 中国电机工程学报,2004,24(12):86-91.
PAN Xiong, XU Guoyu. OPF based ATC calculation with static voltage stability constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 86-91.
- [17] 丁平,周孝信,严剑峰,等. 大型互联电网多断面功率约束潮流算法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(10):8-15.
DING Ping, ZHOU Xiaoxin, YAN Jianfeng, et al. Algorithm of power flow for bulk interconnected grid with transmission interface power constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 8-15.
- [18] 徐泰山,鲍颜红,苏寅生,等. 暂态稳定断面功率极限区间和关联度指标计算[J]. 电力系统自动化,2016,40(20):154-160.
XU Taishan, BAO Yanhong, SU Yinsheng, et al. Calculation of power limit interval and correlation degree for transient stability section[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 154-160.
- [19] SUN J, YUN Z, LIANG J, et al. Wind power forecasting based on a Markov chain model of variation[C]//International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. [S.l.]: IEEE, 2015: 778-782.
- [20] 刘宇,高山,杨胜春,等. 电力系统概率潮流算法综述[J]. 电力系统自动化,2014,38(23):127-135.
LIU Yu, GAO Shan, YANG Shengchun, et al. Review on algorithms for probabilistic load flow in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 127-135.
- [21] 丰颖,负志皓,周琼,等. 考虑风电接入的在线风险评估和预防

控制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 61-68.

FENG Ying, YUN Zhihao, ZHOU Qiong, et al. Online risk assessment and preventive control considering wind-power integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 61-68.

作者简介:

鲍颜红(1971—), 男, 安徽巢湖人, 研究员级高级工程师, 博士, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制



鲍颜红

(E-mail: baoyanhong@sgepri.sgcc.com.cn);

张金龙(1988—), 男, 山东德州人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制(E-mail: zhangjinlong@sgepri.sgcc.com.cn);

江叶峰(1976—), 男, 江苏宜兴人, 高级工程师, 硕士, 从事电力系统调度运行管理方面的研究工作(E-mail: jyf1976@sina.cn)。

(编辑 王锦秀)

Online assessment method of available transfer capacity considering uncertainties of renewable energy output

BAO Yanhong¹, ZHANG Jinlong¹, JIANG Yefeng², XU Wei¹, BI Mingde², YANG Junjun¹

(1. NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Dispatch and Control Center, Nanjing 210024, China)

Abstract: The accurate and efficient online calculation of ATC (Available Transfer Capability) of renewable energy delivery section is of great significance for improving the renewable energy consumption capacity under the premise of maintaining safe and stable operation of the system. An online assessment method of ATC considering the uncertainties of renewable energy output is proposed. Based on the probability of output interval of each renewable energy plant, the probabilistic load flow is calculated to obtain the power interval and its probability of key transmission section. The situation of off-grid renewable energy units and load loss at the receiving end is evaluated to obtain the operational risk. The maximum difference between the revenue and the operational risk is taken as the objective to obtain the ATC value of the section. The effectiveness of the proposed method is verified by the case of an actual power grid.

Key words: renewable energy output; available transfer capacity; online assessment; security and stability; operational risk