

配电网新能源消纳能力评估与 工程应用研究

王延杰¹, 林潮彬¹, 徐国智², 黎清姚¹, 张震业¹, 胡琨¹

(1. 广州锐兴科技有限公司, 广东 广州 510000;

2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 为了满足以新能源为主体的新型电力系统建设, 需要不断提高各个电压等级电网的新能源消纳能力。通过对配电网新能源消纳能力影响因素和提升方法的研究, 提出了基于多因素限制的区域配电网新能源能力评估方法, 分别从高压电网、中压馈线和低压台区进行消纳能力分析, 还提出了基于单位新能源提升投资效益的提升方案优选方法。通过分析, 中压线路主要受到电压越限和热稳定的约束影响, 高压电网主要受到主变容量、上级输电线路等的影响。最后, 通过新能源消纳约束因素和计算模型, 形成实用化的计算工具, 结合不同因素应对措施与方法, 对我国新型电力建设具有重要借鉴意义。

关键词: 新能源; 消纳能力; 提升方案; 新型电力系统

中图分类号: TM46; TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24792

Research on Evaluation and Engineering Application of New Energy Consumption Capacity of Distribution Network

WANG Yanjie¹, LIN Chaobin¹, XU Guozhi², LI Qingyao¹, ZHANG Zhenye¹, HU Kun¹

(1. Guangzhou Rui Xing Technology Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University,

Beijing 100084, China)

Abstract: To adapt to the construction of a novel power system with new energy as the main body, it is necessary to continuously improve the new energy consumption capacity of various voltage-level power grids. Through the research on the influencing factors and improvement methods of new energy consumption capacity of distribution network, a new energy capacity evaluation method of a regional distribution network based on multi-factor limitation was proposed, which analyzed the consumption capacity from the high-voltage power grid, medium-voltage feeder and low-voltage platform area, respectively. In addition, an optimal method of improving the investment efficiency based on unit new energy was also proposed. Through analysis, it is found that medium-voltage lines are mainly affected by voltage crossing and thermal stability constraints. In contrast, high-voltage power grids are mainly affected by main transformer capacity and higher-level transmission lines. Finally, a practical calculation tool was formed through the constraints and calculation models of new energy consumption. Combined with the countermeasures and methods of different factors, the study has important reference significance for China's novel power construction.

Key words: new energy; consumption capacity; enhancement scheme; novel power system

为保障我国能源战略和实现生态可持续发展, 我国提出了“3060碳达峰碳中和”战略发展路径。实现碳达峰、碳中和目标, 能源是“主战场”, 电力是“主力军”, 目前我国电力碳排放占比超过

40%^[1]。2021年3月, 在中央财经委员会第九次会议上, 提出了要构建以新能源为主体的新型电力系统建设战略。根据“十四五”能源规划, 到2030年我国风光总装机容量超过12亿kW, 占比超过

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目(SEPRI-C21200012)

作者简介: 王延杰(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为微电网和能源互联网规划设计, Email: wang1452236658@163.com

50%,到2060年,装机占比将超过60%^[2]。2021年6月,国家能源局下发《关于报送整县(市、区)屋顶分布式光伏开发试点方案的通知》,启动整县(市、区)推进屋顶分布式光伏开发建设的试点工作,通过引导地方政府来协调更多地区屋顶资源,构建规模化的屋顶分布式光伏。

新能源的规模化接入,必将对电网的安全、稳定、可靠运行带来巨大挑战。电网公司作为中央企业,应主动发挥国家队、主力军作用,全力服务和支撑国家碳达峰、碳中和发展目标。因此,开展电网现状的新能源消纳能力评估以及提升电网的消纳能力工作具有重要意义。新能源消纳分析领域已有不少研究,文献[3]以接入点的电压偏差为约束条件,建立评估最大接入新能源容量模型,约束条件单一;文献[4]提出了一种考虑配电网相间保护约束的新能源准入容量计算优化模型,来评估新能源准入消纳容量;文献[5]提出了一种考虑电压和设备容量约束的10 kV配电网光伏容量评估方法,计算相应10 kV线路可消纳的光伏容量。现有的新能源消纳能力评估主要从线损、最大接入容量、单一设备、运行费用等某一个角度出发^[6-9],然而从工程应用或新能源接入方案制定角度考虑,目前的方法考虑因素较少或对方案制定的数据量要求高、计算复杂甚至无法求解^[10],都使得实际的应用过程中存在不足或障碍。

综上所述,文中综合多种规范要求,提出一种基于多因素的区域配电网新能源能力评估方法,建立不同电压等级的消纳能力评估模型,根据线路、配变设备参数和运行数据,以规划方案数据量来满足计算新能源消纳能力的目标,最后在某沿海县区进行验证。

1 新能源消纳能力影响因素

由于传统电网新能源占比较少,大规模新能源接入现状电网将对电网产生较大影响,具体包含电压水平、谐波、短路电流、线损等。

1.1 电压水平影响

根据电力系统运行理论可知,当规模化的新能源接入电网后,其接入与断开本身就会造成接入点功率的大小和方向发生变化,从而造成接入点与系统电压波动。另一方面,由于风电、光伏等新能源受环境影响较大,其输出功率会因为环境变化发生剧烈波动,因此难以实现源荷协同,

导致电网电压波动情况进一步加剧^[11]。

1.2 电能质量影响

新能源通过电力电子装置进行并网,会造成并网点谐波畸变、频率偏差、电压不平衡、电压闪变和直流注入等问题。同时,随着“双碳”目标和新型电力系统建设,新能源的装机容量和占比将快速提高,新能源的不稳定性对电网的电能质量冲击效应也将快速增加。

1.3 短路电流

风电、光伏等新能源电源主要分为逆变器和旋转电机两类,由于等效模型不同,短路电流的计算与短路故障特性也不相同,随着新能源的接入,会造成短路电流增加。一般根据电网短路容量大小来表示电网供电能力的强弱,容量越大,代表电网抗扰动的能力越强,可接受的风电、光伏等新能源消纳的接入容量也较大^[12-13]。

1.4 配电自动化及保护模式

分布式新能源的就近接入与消纳原则致使用户侧也接入新能源电源,并将盈余的电能输送到电网其他用户,导致配电网的潮流呈现双向流动,给配电网的运行和保护带来巨大挑战,对继电保护的影响可以分为引起保护拒动、引起保护误动、自动重合闸不能可靠动作等问题。

1.5 其他

根据南方电网《光伏发电并网技术标准》规定,光伏项目接入电压等级应根据技术经济比较确定,超过500 kW的项目一般情况下应接入10 kV电压等级。新能源的接入点通常位于配电网靠近用户端,经过输送到达用户用电设备,新能源发电特性与用电负荷特性不能很好地耦合,导致新能源倒送情况发生。另外,变电站本身间隔等也会影响新能源的接入^[14]。

2 新能源并网要求

为了规范新能源大规模接入,国家、行业和电网公司都出台了一系列规范与标准,例如《分布式电源并网技术要求》(GB/T 33593—2017)、《分布式电源接入电网承载力评估导则》(DL/T 2041—2019)、《光伏发电并网技术标准》(Q/CSG 1211006—2016)等导则和标准。

2.1 电能质量的技术要求

分布式电源接入配电网后,其接入公共连接点的电压偏差应满足GB/T 12325规范的要求,即:110~35 kV电压等级电网的接入点电压偏差

的绝对值不超过10%;10(20)kV电压等级电网的接入点电压偏差不得超过±7%;0.4 kV电压等级电网的接入点电压偏差为-10%~+7%。

2.2 无功功率与电压调节的技术要求

不同类型的分布式电源接入电网会导致电网无功功率的流向不同,同时根据无功补偿情况,都会直接影响到并网的分布式电源功率因数,应满足GB/T 12325规范或者规划导则要求,此处不再赘述。

2.3 短路与保护技术要求

南网在2019年发布的《110千伏及以下配电网规划技术指导原则》要求,分布式电源接入应满足表1及《分布式电源接入配电网技术规定》(NB/T 32015)等国标、行标及企标的技术规定要求,并满足以下基本原则^[15]:

1)由于潮流流向的改变导致上一级电网需要在继电保护设置等方面做出较大范围调整的,应在上级电网完成调整前,限制该接入点接入的分布式电源总容量,以免潮流流向改变。

2)分布式电源接入点的短路电流与其接入额定电流之比值不宜小于10。

3)分布式电源接入点的短路容量应小于等于电网开断设备的遮断容量。

4)分布式电源接入还需要对接入点的电网设备容量、载流量、热稳定和间隔等条件进行校验。

5)具有上下级物理连接的电网设备,下级接入的电源总容量不应超过上一级允许容量以及额定容量。

6)新能源并网方案应进行多方案经济技术比选,接入电压等级和容量也需要进行校验,宜根据送电方向选取适合接入的电压等级,原则上应在本电压等级内消纳。

表1 并网电压等级与容量^[16]

总容量范围/kW	并网电压等级/kV	
	A+,A,B类供电区	C,D,E类供电区
小于8(含)	0.22	0.22
8~500(含)	0.38	0.38
500~6 000(含)	10	10
6 000~10 000(含)	10(20)	10,35
10 000~30 000(含)	10(20),110	10,35,110
30 000~100 000	110	110
100 000及以上	110,220	110,220

2.4 线损率控制目标

南方电网配网导则中,不同电压等级和供电

分区对线路的要求如表2所示,因此在考虑新能源接入时,会对线损产生影响,从而影响经济效益。

表2 线损与供电分区的关系^[16]

Tab.2 Relationship between line loss and power supply partition

供电分区	不同个电压等级线损率/%				综合线损率/%
	110 kV	35 kV	10(20)kV	0.38 kV	
A+类					
A类	< 0.5	—	< 2	< 2	< 3
B类			< 2.5	< 2.5	< 4.5
C类	< 2	< 2	< 2.5	< 5	< 6
D类	< 3	< 3	< 4	< 7	< 8
E类	< 3	< 3	< 5	< 9	< 12

3 新能源消纳能力评估模型建立

3.1 目标函数设定

随着以新能源为主体的新型电力系统建设与实施,电网中新能源接入容量将快速增长,会导致线路电压抬升,此外,还需要考虑线路本身载流量约束、短路电流约束等。为此,建立一个针对新能源承载能力的求解模型,全面考虑电压、电流等多个约束值,分别求解各约束条件下的新能源最大接入容量并取小值,即为新能源接入最大容量^[17]。

3.2 评估方法

配电网不同电压等级对应的消纳评估指标和模型不同。高压配电网基于热稳定等影响因素,校核主变容量和上一级线路允许容量确定消纳水平;中压配电网基于热稳定、短路电流、电压越限、线损等影响因素,校核线路的允许容量确定消纳能力;低压配电网基于电压越限、三相不平衡等影响因素,校核台区和线路的允许容量确定消纳水平^[18-20],详细如图1所示。

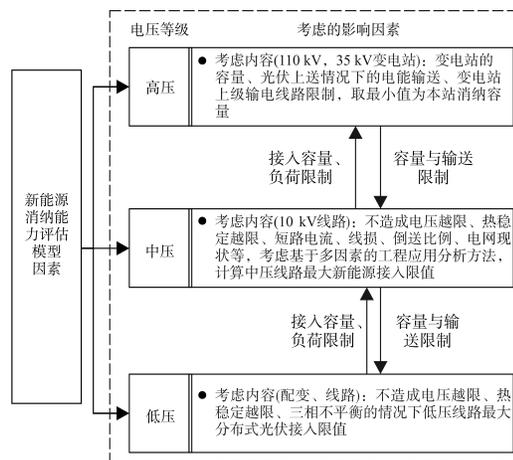


图1 新能源消纳能力评估模型考虑主要因素

Fig.1 Main factors considered in the evaluation model of new energy consumption capacity

3.3 高压配电网新能源消纳水平分析方法

分布式光伏原则上按照国家要求全额消纳, 优先考虑就近接入所在供电片区, 以就地消纳为主。由于 10 kV 及以下电压等级, 分布式光伏全额接入, 难以在更大范围内统筹规划、优化配置, 须就近接入所在供电片区, 以就地消纳为主。因此, 对高压配电网(35 kV 变电站级、110 kV 变电站级)须基于分布式电源分析区域的布局情况, 进行变电站级的接纳能力分析, 进一步分析区域电网的承载能力, 为提出输变电工程项目需求提供基础。具体方法和依据如下:

1) 综合考虑变电站负载情况、主变容量规模, 测算 110 kV, 35 kV 电压等级各变电站单站供电片区对新增分布式电源的承载能力。

2) 按照区域上级变电容量进行限制, 即接入分布式电源总容量不超过上级变电站和本级线路的容量。

3) 考虑新能源接入容量需要上送, 因此变电站的上级线路作为限制条件。

4) 考虑高压配电网可靠性, 变电站主变需满足 $N-1$ 校验, 即考虑一台主变故障时, 变电站其他主变能转接所有负荷并正常运行。

5) 考虑 110 kV 用户专站均为末端站, 高压配电网新能源消纳水平评估不统计作为终端站的用户专站。

综上, 约束模型如下所示:

$$\begin{cases} S_T + P_T \geq \phi_T \\ S_L + P_T \geq \phi_T \\ T_{N-1} \text{ 通过} \\ S_T \geq \phi_T \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_T 为变压器容量; P_T 为变压器所带负荷; T_{N-1} 为设备 $N-1$ 通过率; S_L 为变压器上级线路安全容量; ϕ_T 为新能源接入容量限制。

3.4 中压配电网新能源消纳水平分析方法

根据电压公式, 当 R, X 为最大值时, 即新能源集中接入线路末端为极端情况, 若此时线路电压不越限, 则任何接入点均能满足要求, 因此文中考虑新能源集中接入中压线路末端的情况, 然后按照修正系数进行修正。

3.4.1 评估指标及计算

简化的中压评估模型如图 2 所示。馈线首端为平衡节点, $P + jQ$ 为中压线路输送功率, $R + jX$ 为线路阻抗, $P_L + jQ_L$ 为线路总功率, $P_0 + jQ_0$ 为线路所有新能源电源出力。

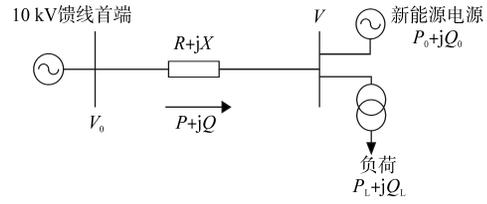


图2 简化后的含新能源电源的中低压配电线路模型

Fig.2 Simplified model of medium and low voltage distribution line with new energy power supply

对于中压配电网, 综合上述导则和技术标准, 以热稳定校核、电压偏差、短路电流以及系统网损为关键指标进行约束; 对于低压配电网, 以配变为节点, 主要考虑配变容量、三相不平衡等的约束。

热稳定校核。根据《分布式电源接入电网承载力评估导则》, 热稳定评估应采用评估周期内负载率 λ 的最大值 λ_{\max} 作为评估指标。

评估该线路可新增新能源容量为

$$\phi_{11} = (1 - \lambda_{\max}) \times S_L \times K_r \quad (2)$$

式中: K_r 为设备运行裕度, 取值 0.8。

短路电流计算。新能源电源未接入电网, 三相短路电流值计算模型经过变换为

$$I_{k1} = \frac{U}{\sqrt{3} \times \sqrt{X^2 + R^2}} \quad (3)$$

式中: U 为短路所在回路的额定电压; X, R 分别为短路回路的电抗值和电阻值。

则新能源电源接入电网后, 计算模型为

$$I_{k2} = I_{k1} + cU_n / [\sqrt{3} K_G (R_G + jX_d)] \quad (4)$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \times \frac{c_{\max}}{(1 + x'_d \sin \alpha_{rG})} \quad (5)$$

其中 $x'_d = X_d / (U_{rG}^2 / S_{rG})$

式中: c, c_{\max} 分别为电压系数和最大电压系数; R_G 为发电机的电阻; X_d 为发电机的电抗; U_n 为系统标称电压; U_{rG} 为发电机额定电压; α_{rG} 为发电机额定功率因数角; x'_d 为发电机的相对电抗; S_{rG} 为发电机容量。

根据规范要求, 接入点短路电流需要大于 10 倍分布式电源额定电流, 可求出线路最大接入容量 ϕ_{12} , 即为短路条件约束下的新能源最大装机容量。约束条件如下:

$$\begin{cases} I_{k2} \leq 20 \text{ A} \\ I_{k2} \geq 10 \times \phi_{12} / (\sqrt{3} U) \\ \phi_{12} = \{ [\sqrt{3} c_{\max} \times U_{rG} \times (I_{k2} - I_{k1}) \times (R_G + jX_d)] - U_{rG}^2 \times \sin \alpha_{rG} \} / (\sin \alpha_{rG} \times X_d) \end{cases} \quad (6)$$

其中, I_{k2} 根据电网实际值计算求得。

电压偏差计算。接入新能源后, 线路功率计算模型为

$$\begin{cases} P = P_1 - P_0 \\ Q = Q_1 - Q_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: P, Q 为从电网输送的有功和无功功率; P_1, Q_1 为负荷的有功和无功功率; P_0, Q_0 为新能源发出的有功和无功功率。

不计电压降落横分量, 新能源所在中压线电压损耗为

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{U_0 - U}{U_0} \\ &= \frac{PR + QX}{U_0} \times 100\% \end{aligned} \quad (8)$$

式中: U_0, U 为首末端电压。

新能源接入点的电压为

$$\begin{aligned} U &= U_0 - \Delta U \\ &= U_0 - \frac{PR + QX}{U_0} \\ &= U_0 - \frac{(P_1 - P_0)R + (Q_1 - Q_0)X}{U_0} \end{aligned} \quad (9)$$

当新能源出力大于负荷时, P, Q 为负值进行计算, 由式(9)可知, 节点电压受到首端电压、线路物理参数、负荷等因素影响。同时, 结合文献[5]中证明可知, 节点电压与该部分参数成线性关系, 且电压越限指标下的新能源接入容量可以用参数的线性组合进行表达, 具体为

$$\gamma_{13} = C + al + bS + cU_0 + d\beta + e\alpha + fS_n \quad (10)$$

式中: γ_{13} 为新能源接入容量与线路安全容量的比值; l 为线路长度; S 为线径面积; β 为线路平均负载率; α 为负荷功率因数; S_n 为配变装接容量; a, b, c, d, e, f, C 分别为上述变量的系数, 通过本地数据进行拟合求解。

上述变量用标幺值表示。电压越限条件下的新能源接入容量为

$$\phi_{13} = \gamma_{13} \times L_n \quad (11)$$

式中: L_n 为线路容量。

线损率计算。新能源接入到电网后, 线路损耗如下:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{loss}} &= I^2 R \\ &= \left\{ \frac{P_1 - P_0 + j(Q_1 - Q_0)}{U_0 - [(P_1 - P_0)R + (Q_1 - Q_0)X]/U_0} \right\}^2 \times R \end{aligned} \quad (12)$$

系统线损率为

$$\Delta P_{\text{loss}} \% = \frac{\Delta P_{\text{loss}}}{P} \times 100\% \quad (13)$$

根据系统线损率要求, 可求出线路允许接入的新能源电源最大容量 ϕ_{14} 为

$$\phi_{14} = \frac{(\Delta P_{\text{loss}} \%)_{\text{max}} \times U^2 \times \alpha}{R \times [1 - (\Delta P_{\text{loss}} \%)_{\text{max}}]} \quad (14)$$

再考虑将线路或上级设备的容量作为限制, 即不超过设备容量约束下的新能源最大装机容量为 ϕ_{15} 。

同时, 新能源接入对于接入点的谐波影响较大, 但是对于工程应用来说, 谐波测量和计算比较麻烦, 因此可以作为一个校验指标, 电压总谐波畸变率模型如下式所示:

$$\text{THD}_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_b} \quad (15)$$

式中: U_b 为基波电压; U_h 为第 h 次谐波电压。

中压修正系数及项目评估模型。由于按照末端考虑, 当接入中间段和首端时, 通过模拟及仿真分析, 得到如表3所示的四分段近似平均修正系数。

表3 新能源接入位置修正系数

Tab.3 Correction coefficient of new energy access location

接入位置	修正系数	
	电缆线路	架空线路
首端—1/4	1.45	1.40
1/4—1/2	1.35	1.29
1/2—近末端	1.17	1.12
末端	1.00	1.00

基于上述评估模型和规划项目投资情况, 可分析规划项目库中不同项目单位投资的新能源消纳能力提升容量并进行项目优选。

3.4.2 总体评估模型与约束条件

建立一个针对实际网架的求解模型, 综合热稳定校核、短路电流、电压偏差、线损率、线路安全容量等5个约束指标 ($\phi_{11} \sim \phi_{15}$), 求出新能源电源接入容量峰值。模型目标函数为

$$F_{\text{max}} = \min\{\phi_{11}, \phi_{12}, \phi_{13}, \phi_{14}, \phi_{15}\} \quad (16)$$

其中, 热稳定校核的约束条件如下:

$$\begin{cases} P \leq P_c \\ \lambda \leq 80\% \end{cases} \quad (17)$$

式中: P, P_0 分别为实际功率和设备额定功率; λ 为反向负载率。

短路电流 I_{k2} 的约束条件^[18]为

$$I_{k2} \leq 20 \text{ A} \quad (18)$$

电压偏差的约束条件为

$$U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax} \quad i \in N \quad (19)$$

式中: N 为10 kV线路的分支节点总数; U_{imax}, U_{imin} 分别为节点电压上、下限。

系统线损的约束条件为

$$\Delta P_{loss} \% \leq \Delta P_{max} \% \quad (20)$$

式中: $\Delta P_{max} \%$ 为满足系统线损率的最大值。

3.4.3 评估流程

中压新能源消纳水平评估的流程图如图3所示。

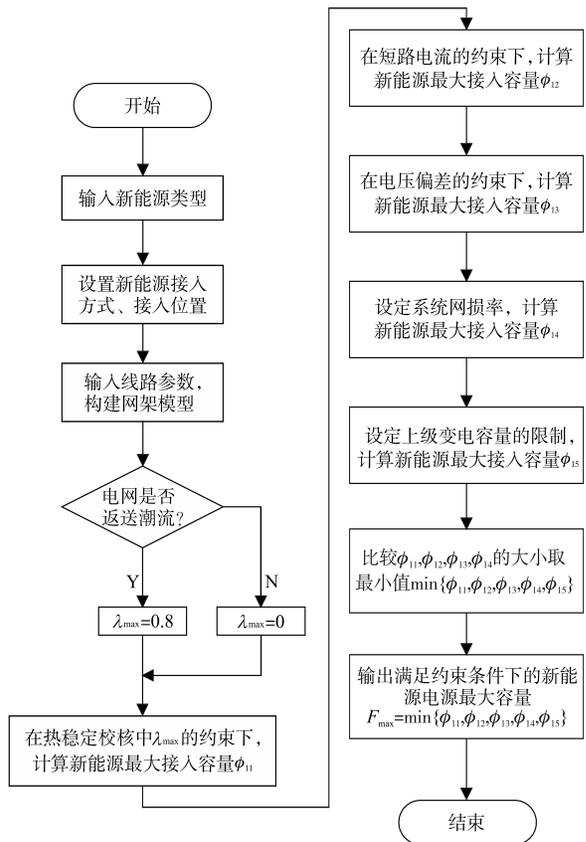


图3 中压新能源消纳水平评估流程图

Fig.3 Flow chart for evaluation of medium voltage new energy consumption level

3.5 低压台区新能源消纳水平评估方法

3.5.1 考虑新能源不能倒送情况

1)三相不平衡。新能源单相接入后,线路的 m ($m=A, B, C$)相电流为

$$i_m = \frac{P_{lm} - P_0}{U_m} \times 100\% \quad (21)$$

式中: P_{lm} 为一相负荷功率; P_0 为新能源接入功率;

U_m 为相电压; i_m 为相电流。

单相接入会使得某相线路电流减小,三相接入后则使三相电流均减小,从而导致电流不平衡度的改变。新能源接入后,随着出力的增大,从配变低压侧流出的电流值减小,导致配变的三相不平衡变化,总体看,单相接入对三相不平衡的影响比三相接入更大。

2)评估模型。求出新能源电源接入容量峰值,模型目标函数为

$$F_{max} = \min \{ \phi_{T1}, \phi_{T2} \} \quad (22)$$

式中: ϕ_{T1} 为根据式(21)和三相不平衡要求(小于15%)计算的新能源极限接入容量值; ϕ_{T2} 为配变容量。

式(22)为2个约束条件下计算的极小值,考虑到低压新能源不倒送的原则,三相不平衡的约束条件为

$$\begin{cases} \sum_{i=k}^{n_A} DP_{Li} - P_0 \geq 0 \\ \sum_{i=k}^{n_B} DP_{Li} - P_0 \geq 0 \\ \sum_{i=k}^{n_C} DP_{Li} - P_0 \geq 0 \\ 0 \leq i_{zl} \leq i_{zmax} \quad zl \in N \end{cases} \quad (23)$$

式中: P_{Li} 为低压单相负荷; i_{zl} 为支路的电流幅值; i_{zmax} 为支路电流幅值的最大值; n_A 为A相负荷节点总数; n_B 为B相负荷节点总数; n_C 为C相负荷节点总数; D 为条件判别因子,单相取1,三相取1/3; N 为支路数。

3.5.2 考虑新能源可以倒送情况

随着分布式光伏的大力推进,部分台区的负荷可能出现倒送的情况,结合海南电网实际情况看,需要对新能源可以倒送的情况进行评估,具体如下:

1)计算配变上级10 kV的输电容量,按照最小截面进行计算,结果为 D_1 ;

2)按照配变重载限制,即负载率为80%的负荷值计算,结果为 D_2 ;

3)低压侧额定功率的不重载负荷值减去已接入新能源负荷加上终端负荷值,然后转化为新能源容量,结果为 D_3 ;

4)求取 $\min(D_1, D_2, D_3)$,即为可以倒送情况下,单台配变最大新能源消纳能力。

4 案例分析

4.1 地区现状

以沿海某县为分析对象,截至2021年底,该地区共有110 kV公用变电站5座,总降压容量449 MV·A,110 kV线路17回;35 kV公用变电站8座,总降压容量126.9 MV·A,35 kV线路12回。10 kV线路共有141回,其中公用线路118回,专用线路23回;10 kV公用配电变压器1 529台,总容量546.53 MV·A。

4.2 评估指标计算表

根据上述承载力分析模型,计算不同电压等级的新能源消纳能力。高压、中压、低压电网新能源消纳能力如表4~表6所示。

4.3 因素及特点分析

通过分析可知,该地区新能源消纳能力,高压主要受部分主变容量较小、上级线路容量限制以及负荷较小导致;中压受电压不越限和热稳定约束的影响;低压主要受三相不平衡、负荷等因

素限制,具体如表7所示。

表4 高压电网新能源消纳能力情况

Tab.4 New energy consumption capacity of high voltage power grids

变电站名称	电压等级/kV	单站供电片区承载能力/MW		
		光伏	风电	其他
XB站	110	91.99	90.63	86.11
CD站	110	132.38	132.38	127.87
⋮	110/35	⋮	⋮	⋮
合计	-	948.33	1 327.64	737.57

表5 中压电网新能源消纳能力情况

Tab.5 New energy consumption capacity of medium voltage power grids

10 kV线路名称	接入本条线路的电源装机容量/kW			线路最大接入容量	单条中压线路承载能力 ^① /kW
	光伏	风电	其他		
JF线	300	0	200	6 668.4 kW	2 135.22
YC线	100	200	400	3 464.1 kW	1 600
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
合计	22.44	15	1.75	1 269.16 万 MW	595 126.67

表6 低压电网新能源消纳能力情况

Tab.6 New energy consumption capacity of low voltage power grids

新能源容量约束/万 kW		允许新能源接入容量 ^② /万 kW	单相接入容量限值/万 kW			三相允许接入容量限值/万 kW
10 kV高压侧线路输送容量	配变容量限制		最大相允许接入容量限值	中间相允许接入容量限值	最小相允许接入容量限值	
1 289.23 ^③	43.72	43.72	31.34	27.76	24.8	40.23
1 289.23 ^④	43.72	43.72	-	-	-	56.21

注:①按照地区光伏、风电和其他新能源的装机占比计算,其中对应出力系数分别取0.7,0.5,0.9;②指10 kV线路和配变约束的综合值;③与④分别指不考虑倒送和考虑倒送情况下的新能源消纳能力。

表7 地区整体限制新能源消纳的因素及措施

Tab.7 Factors and measures that restrict the consumption of new energy in the region as a whole

电压等级	主要限制因素	改善措施
高压	设备(线路、主变)容量、负荷的限制	扩大线径、主变增容和新建等方式
中压	电压不越限、热稳定约束	调压器、加大电能替代、扩大线径、减少供电半径等
低压	三相不平衡度、配变容量、负荷	调整三相负荷、增大设备容量及负荷等

通过与实际过程中的新能源接入对比可知,新能源评估接入容量与实际接入容量误差在12.56%范围内,满足工程需求。其中,中压线路承载能力主要受热稳定、电压不越限约束,在电压不越限的指标下,单条中压线路承载能力主要受线路平均负荷的影响(40条,占比47.06%),因此可以通过精准规划和负荷优化,提升单条线路

的新能源承载能力。

4.4 规划项目提升分析

对影响新能源消纳能力的配电网建设项目类型进行筛选,该地区共计筛选出46个符合项目,共计提升新能源消纳能力为141.56 MW,一类项目单位投资新能源接入容量提升效果为9.61 kW/万元;三类项目单位投资新能源接入容量提升效果为9.42 kW/万元,总体规划项目单位投资新能源接入容量提升效果为9.50 kW/万元。按照投资效益,筛选出排名前10的项目列入投资计划中。

在所分析的46个项目中,以项目投资323.82万元、新能源接入容量提升3 077.32 kW为基准划分四个象限,其中,第一象限13个规划项目,第二象限6个规划项目,第三象限23个规划项目,第四象限4个规划项目,详细如图4所示。根据

分析结果可知,应使较多的项目位于第二象限,减少出现在第一象限和第三象限,避免出现在第四象限。在第四象限的项目主要原因是新建工程投资额比较大,以及新建线路较长和配变装接容量低、负荷较低。

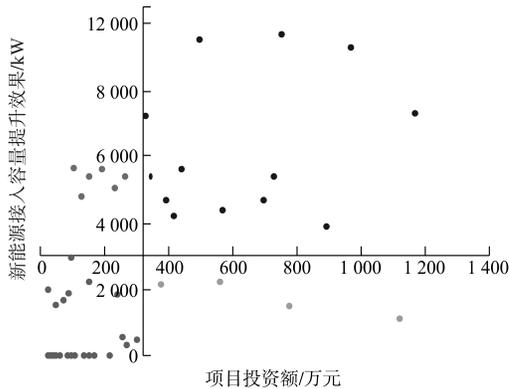


图4 规划项目投资和消纳能力提升效果分布图

Fig.4 Distribution diagram of planned project investment and consumption capacity improvement effect

5 结论

文中以提升分布式新能源消纳能力为目标,建立了高压主变以设备容量、 $N-1$ 等指标为限制的新能源接入评估;中压配网以电压越限、短路电流、设备安全容量、热稳定和线损为限制指标的新能源消纳能力评估模型;低压以三相不平衡、设备容量为限制指标的新能源消纳能力评估模型,最后以Excel VBA为基础,开发了一种配网新能源消纳能力评估工具表,以规划方案为依据,评估区域内配电网不同电压等级可接纳分布式新能源能力,根据消纳能力及接入情况,辅助规划人员提出电网建设方案和增强配电网适应及调节能力的综合方案。

同时,随着数字电网技术、人工智能技术等发展,在构建以新能源为主体的新型电力系统过程中,需要利用数字化、智能化的手段,保障接入电网的新能源优先发电,促进新能源在终端能源消费中占据主体位置,保障碳达峰碳中和的实现,为此,提出以下措施:

- 1)持续完善新能源消纳评估理论与机理;
- 2)挖掘电力系统灵活资源与制定市场机制,促进新能源消纳;
- 3)深化电能替代和新电气化战略;
- 4)提升电网数字化、智能化,促进源网荷协同发展。

参考文献

- [1] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 舒印彪,张丽英,张运洲,等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J]. 中国工程科学,2021,23(6):1-14.
SHU Yinbiao, ZHANG Liying, ZHANG Yunzhou, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1-14.
- [3] 胡骅,吴汕,夏翔,等. 考虑电压调整约束的多个分布式电源准入功率计算[J]. 中国电机工程学报,2006,26(19):13-17.
HU Hua, WU Shan, XIA Xiang, et al. Computing the maximum penetration level of multiple distributed generators in distribution network taking into account voltage regulation constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 13-17.
- [4] 雷金勇,黄伟,夏翔,等. 考虑相间短路影响的分布式电源准入容量计算[J]. 电力系统自动化,2008,32(3):82-86.
LEI Jinyong, HUANG Wei, XIA Xiang, et al. Penetration level calculation with considerations of phase-to-phase short circuit fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 82-86.
- [5] 张勇军,张紫珩. 考虑电压约束的10 kV配电网光伏容量评估[J]. 电网与清洁能源,2017,33(3):119-124,130.
ZHANG Yongjun, ZHANG Ziheng. Assessment of photovoltaic power capacity in 10 kV distribution network considering voltage constraints[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(3): 119-124, 130.
- [6] 张沈习,李珂,程浩忠,等. 考虑相关性的间歇性分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化,2015,39(8):53-58,140.
ZHANG Shenxi, LI Ke, CHENG Haozhong, et al. Optimal siting and sizing of intermittent distributed generator considering correlations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 53-58, 140.
- [7] 唐念,夏明超,肖伟栋,等. 考虑多种分布式电源及其随机特性的配电网多目标扩展规划[J]. 电力系统自动化,2015,39(8):45-51.
TANG Nian, XIA Mingchao, XIAO Weidong, et al. Multiobjective expansion planning of active distribution systems considering distributed generator types and uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 45-51.
- [8] 曾鸣,杜楠,张鲲,等. 基于多目标静态模糊模型的分布式电源规划[J]. 电网技术,2013,37(4):954-959.
ZENG Ming, DU Nan, ZHANG Kun, et al. Distributed generation planning based on multiobjective static fuzzy model[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 954-959.
- [9] 袁云山,刘源,刘慨然,等. 配电网中新能源最优接入的评价

- 方法[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(6): 16-20.
YUAN Yunshan, LIU Yuan, LIU Kairan, et al. An evaluation method of new energy optimal accessing to distribution network [J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(6): 16-20.
- [10] 董开松, 刘琛琛, 张惠智. 基于电流保护约束的逆变型分布式电源最大接入容量与接入位置选择[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(7): 106-111.
DONG Kaisong, LIU Chenchen, ZHANG Huizhi. Maximum access capacity and connection point choice of inverter interfaced DG based on current protection constraints[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(7): 106-111.
- [11] 刘澄, 王辉, 李天慧, 等. 分布式新能源发电对配电网电压影响研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(10): 1465-1471.
LIU Cheng, WANG Hui, LI Tianhui, et al. Study on influence of distributed new energy generation on distribution network voltage[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(10): 1465-1471.
- [12] 王成山, 孙晓倩. 含分布式电源配电网短路计算的改进方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 54-58.
WANG Chengshan, SUN Xiaoqian. An improved short circuit calculation method for distribution network with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 54-58.
- [13] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 65-74.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid within inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65-74.
- [14] 侯玉强, 李威. 大规模光伏接纳对电网安全稳定的影响及相关制约因素分析[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(4): 73-76, 84.
HOU Yuqiang, LI Wei. Influence of integration of large-scale photovoltaic on grid and key factors restricting its accepted capacity[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(4): 73-76, 84.
- [15] 赵龙, 李文升, 曹永吉, 等. 计及源荷匹配特性的新能源可信容量评估方法[J]. 现代电力, 2023, 40(5): 687-695.
ZHAO Long, LI Wensheng, CAO Yongji, et al. Renewable energy credible capacity assessment method considering source-load matching characteristics[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(5): 687-695.
- [16] 陈旭, 叶琳浩. 110千伏及以下配电网规划技术指导原则[S]. 广州: 中国南方电网有限责任公司, 2019.
CHEN Xu, YE Linhao. Technical guidelines for distribution network planning of 110 kV and below[S]. Guangzhou: China Southern Power Grid Co., Ltd., 2019.
- [17] 梁双, 胡学浩, 张东霞, 等. 考虑风速变化特性的风电容量可信度评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 18-27.
LIANG Shuang, HU Xuehao, ZHANG Dongxia, et al. The reliability assessment method of wind power capacity considering the characteristics of wind speed variation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 18-27.
- [18] 蔡佳铭, 林其友, 刘涌. 高占比可再生能源系统消纳能力指标评估与分析[J]. 电测与仪表, 2018, 55(7): 53-61.
CAI Jiaming, LIN Qiyu, LIU Yong. Index analysis and evaluation of consumption capacity for high proportion renewable energy system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(7): 53-61.
- [19] 李晓鹏, 蔡文斌, 吕海霞. 计及不确定性的微比例清洁能源在微电网中的消纳[J]. 电气传动, 2022, 52(3): 45-50.
LI Xiaopeng, CAI Wenbin, LÜ Haixia. A high proportion of clean energy consumption in the microgrid taking into account uncertainty[J]. Electric Drive, 2022, 52(3): 45-50.
- [20] 蔡文斌, 程晓磊, 南家楠, 等. 高比例新能源电力系统灵活性资源充裕性评估分析[J]. 电气传动, 2022, 52(20): 57-62.
CAI Wenbin, CHENG Xiaolei, NAN Jianan, et al. Assessment and analysis of adequacy of flexibility resource of power system with high proportion new energy[J]. Electric Drive, 2022, 52(20): 57-62.

收稿日期: 2022-11-20

修改稿日期: 2022-12-14