

考虑分布式光伏消纳的大型城市配电网规划实践

贺国伟^{1,2}, 肖峻¹, 曹加胜²

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072; 2. 北京电力经济技术研究院有限公司, 北京 100055)

摘要: 针对我国大型城市配电网未来面临的光伏消纳问题, 以北京市某供电区域为对象, 开展了考虑分布式光伏消纳的城市配电网规划实践。首先, 根据规划约束条件, 形成了考虑分布式光伏消纳的配电网规划方法和带优先级顺序的改造方案; 然后开展了规划实践, 依次对配电网现状进行了梳理、对光伏消纳进行了分析, 结合负荷预测和光伏装机容量预测, 提出了2030年城市配电网的规划方案, 并给出了保护改造和升级应急抢修服务网络体系的具体措施; 最后, 总结了考虑光伏消纳的大型城市配电网规划建议。对于大型城市的配电网规划, 研究成果集中在光伏对电压和供电可靠性的影响、光伏接入后保护的改造方案及常规网架结构的适应性等方面, 具有参考价值。

关键词: 配电网; 光伏消纳; 电压; 供电可靠性; 网架结构

中图分类号: TM72 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19421/j.cnki.1006-6357.2021.10.004

0 引言

随着社会经济的发展, 对供电可靠性和电压质量的要求越来越高^[1-3], 尤其是重要用户, 对可靠性要求达99.999%, 电压合格率要求达99.99%。然而, 大型城市中, 用地越来越紧张, 变配电设施的选址建设受到限制^[4]; 此外, 随着分布式光伏渗透率的不断提高, 其随机性、间歇性和波动性给配电网带来重要影响^[5], 例如电压越限和控制保护装置的误动作等^[6-9], 进而对城市配电网的安全性和可靠性产生影响^[10-11]。

将分布式光伏的接入与消纳纳入城市配电网规划已成为必然趋势。目前的研究, 主要通过建立规划模型来优化定容和选址, 文献[12]以准入容量最大化为目标, 通过遗传算法求解配电网中分布式电源的最大接入容量; 文献[13]在规划阶段通过计算馈线上所有负荷等级下分布式光伏电源的最大允许输出功率并采用相关观测数据, 得出分布式光伏在配电网中的峰值接入容量; 文献[14]把电压、潮流等作为优化目标, 采用多岛遗传算法实现分布式电源的位置最优规划。文献[15]将N-1准则应用到规划模型中, 提

出一种计及主变压器(简称主变)、馈线N-1约束的分布式光伏规划模型, 从而保证规划所得的选址定容方案能满足N-1安全。部分文献给出了规划阶段的建议和措施, 文献[16]就分布式电源接入配电网时, 电压等级的选择、接入系统的方案、并网装置的功能等给出了建议和依据; 文献[17]以建设和运营成本最小为目标函数, 利用层次分析法, 提出了分布式光伏接入配电网的改造措施; 文献[18]指出系统安全是限制可再生能源高比例的瓶颈, 提出了基于安全边界的规划思路。

综上, 分布式电源消纳的理论研究较多, 但针对大型城市的配电网规划实践的文献尚不多见。本文从实践的角度出发, 结合分布式光伏消纳, 开展北方特大型城市的10 kV配电网规划。在分析分布式光伏消纳情况基础上给出2030年中压配电网规划方案。本文通过规划实践, 试图回答光伏对可靠性、电压、保护的影响、现有接线适应性等重要问题, 并总结实现分布式光伏消纳的大型城市配电网规划建议。

1 规划方法和步骤

大型城市特别是城市中心, 负荷密度在相对较大的基数上仍在不断增长, 而日益紧张的城市用地严重限制了变配电设施的建设, 进而影响到规划方案的实施性; 因此, 在规划中, 除了要考虑分布式光伏接

基金项目: 国家重点研发计划项目“高比例可再生能源并网的电力系统规划与运行基础理论”(2016YFB0900100)。

Supported by National Key Research and Development Program of China (2016YFB0900100)。

[引文信息] 贺国伟, 肖峻, 曹加胜. 考虑分布式光伏消纳的大型城市配电网规划实践[J]. 供用电, 2021, 38(10): 26-34.

HE Guowei, XIAO Jun, CAO Jiasheng. Planning practice of large urban distribution network considering distributed photovoltaic consumption [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(10): 26-34.

人对规划约束的影响外，还要考虑城市用地这一实际情况。

1.1 规划约束条件

1.1.1 电压越限约束

分布式光伏的接入会抬高配电系统中的节点电压，在功率倒送时甚至会出现电压越限的情况。通过有载调压变压器（on-load tapping transformer, OLTC）调整避免电压越上限时，在当光伏退出运行后，有些节点又会出现严重的低电压问题，受OLTC调节频率和调节幅度的限制，仅依靠OLTC的调节无法满足电网对电压质量的要求；此时，足够的动态无功容量成为解决低电压问题的主要手段^[19]。图1为辐射式馈线典型结构，以图1为例对包含光伏和无功装置的电压约束进行说明。

图1中， U_M 为节点M的电压， R_M 、 X_M 表示两节点之间的电阻和电抗值， P_{LM} 、 Q_{LM} 为节点M处有功和无功功率， P_{PV} 为节点M处光伏有功功率， Q_C 为系统配置的无功补偿容量。

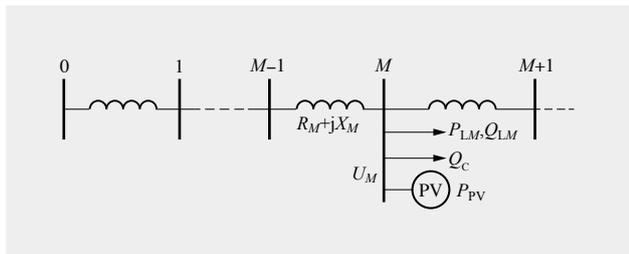


图1 辐射式馈线典型结构

Fig.1 Typical structure of a radial feeder

根据文献[20]计算公式，当光伏投入时，节点M的电压应满足：

$$U_M = \sqrt{U_0^2 - 2 \sum_{m=1}^M [(P_{Lm} - P_{PV})R_m + Q_{Lm}X_m]} \leq U_{\max} \quad (1)$$

当光伏退出运行，为保证电压不越下限，无功补偿装置投入运行，此时节点M的电压应满足：

$$U_{\min} \leq U_M = \sqrt{U_0^2 - 2 \sum_{m=1}^M [P_{Lm}R_m + (Q_{Lm} - Q_C)X_m]} \quad (2)$$

式中： U_{\max} 、 U_{\min} 分别为节点电压的上、下限。

1.1.2 主变压器N-1约束

分布式光伏及无功补偿接入配电网时，其容量也需满足N-1安全约束条件。

图2为简化的配电网接线图。主变T1、T2所带负荷分别为 P_1 、 P_2 ，两主变通过馈线 F_1 、 F_2 之间常开联络开关QF2进行联络， S_{L1} 、 S_{L2} 为两条馈线所带负荷；新增负荷 S_L 、无功装置 S_{Qc} 以及分布式光伏 P_{PV} 均接入馈线 F_1 。

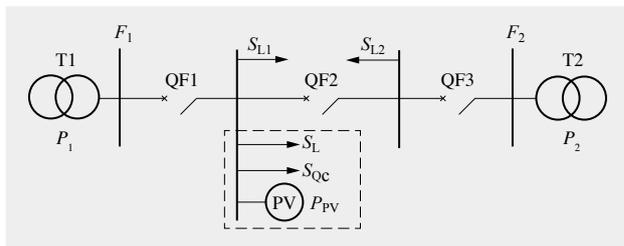


图2 主变压器及馈线N-1示意情况

Fig.2 N-1 diagram for main transforms and feeders

当T1发生N-1故障时，考虑光伏出力的间歇性及不同工况，根据文献[21]的方法，求得T2需满足的N-1潮流约束条件如下：

1) 当分布式光伏运行时，通过联络开关QF2接入主变T2的负荷 S_{L1} 、新增负荷 S_L 、分布式光伏 P_{PV} 以及主变T2的负荷 P_2 之和不得超过主变T2的容量：

$$S_{L1} + S_L - P_{PV} + P_2 \leq C_{T2} \quad (3)$$

2) 当PV退出运行，考虑无功补偿 S_{Qc} 投入时：

$$S_{L1} + S_L + S_{Qc} + P_2 \leq C_{T2} \quad (4)$$

式中： C_{T2} 为主变T2的额定容量。

1.1.3 馈线N-1约束

图2中， F_1 出口发生N-1故障时，联络开关QF2闭合，考虑光伏出力的间歇性和不同运行工况，求得 F_2 需满足的N-1潮流约束条件如下：

1) 当分布式光伏运行时，馈线 F_1 、 F_2 原有负荷以及新增负荷 S_L 、新接入光伏 P_{PV} 之和不得超过馈线 F_2 的容量 C_{F2} ：

$$-C_{F2} \leq S_{L1} + S_{L2} + S_L - P_{PV} \leq C_{F2} \quad (5)$$

式(5)考虑到光伏接入后可能存在逆向潮流，需保证转带后无论潮流方向如何，均不得超出转入线路的容量。

2) 当分布式光伏退出运行，无功补偿 S_{Qc} 投入时，馈线 F_1 、 F_2 原有负荷以及新增负荷 S_L 、无功补偿容量 S_{Qc} 之和不得超过馈线 F_2 的容量 C_{F2} ：

$$S_{L1} + S_{L2} + S_L + S_{Qc} \leq C_{F2} \quad (6)$$

1.1.4 短路电流约束

短路电流是设备的动、热稳定校验的依据，涉及配电网的安全运行，当分布式光伏接入电网时，配电网的计算短路电流应满足约束条件：

$$i_k \leq i_{k\max} \quad (7)$$

式中： i_k 为计算短路电流； $i_{k\max}$ 为相应电压等级短路电流限定值。

此外，投资约束等也是影响配电网规划的重要因素，限于文章篇幅，本文不做详述。

1.2 考虑优先级顺序的改造措施

改造措施优先级按照2个维度进行划分。为了减

少土地使用和充分挖掘并利用现有配电网的供电能力,将线路改造优先级列在变电站改造之前。

线路的改造主要用于解决规划中出现电压、电流越限,以及线路不满足 $N-1$ 要求等问题;增大线路截面积可以完全利用现有路径资源,因而优先级最高;增加电缆数量是在增加单根电缆截面积无法满足要求时,采用2根或多根电缆的方式,因为需要占用现有路径资源,优先级居次;规划新的路径并扩建变电站馈线间隔是最后的选择方案。

对于变电站的改造,主要是针对容量不足的问题:更换主变和扩建主变都无需增加土地需求,把更换主变作为首选方案主要出于投资成本考虑;新建变电站的方案只在现有配电网供电能力已充分利用但仍不能满足要求的情况下采用。

此外,足够的无功补偿装置是解决低电压问题的主要手段。当短路电流不满足要求时,应有针对性措施,如改变10 kV中压配电网的接地方式,或选用较高阻抗的变压器。

1.3 规划步骤

1) 从110 kV变电站开始,对10 kV配电网现状进行梳理,包括网架结构、主变负载率、变电站间隔资源、馈线形式、馈线容量、馈线负载率以及联络形式、负荷情况以及分布式电源的装机容量。

2) 对区域内负荷及分布式光伏装机容量进行预测。

3) 从 $N-1$ 安全性、电压质量等方面,验证现有电网是否同时满足负荷的增长及分布式光伏的消纳;针对不满足约束的问题,根据优先级顺序采取相应改造措施。

4) 光伏接入后,会对传统保护装置造成影响,应对关联保护进行改造以提高系统的供电可靠性。另外,配电自动化和应急抢修服务网络体系能够极大缩短故障后供电恢复时间,是配电网建设和改造的必要组成部分,在规划时应充分考虑。

考虑分布式光伏消纳配电网规划流程见图3。

需要说明的是,本文在配电网规划中考虑分布式光伏,主要原因如下:首先,分布式光伏的装机容量远大于其他种类的分布式电源;其次,受能源形式的限制,接入城市配电网中的分布式电源以光伏为主,其他形式的分布式电源比重较小,对配电网的影响也较小。本文给出的规划方法也可以作为其他分布式电源接入配电网时的参考,但其他种类的分布式电源在运行方式和出力特性方面与分布式光伏相比还存在差异,在规划时应根据其特点进行针对性分析。

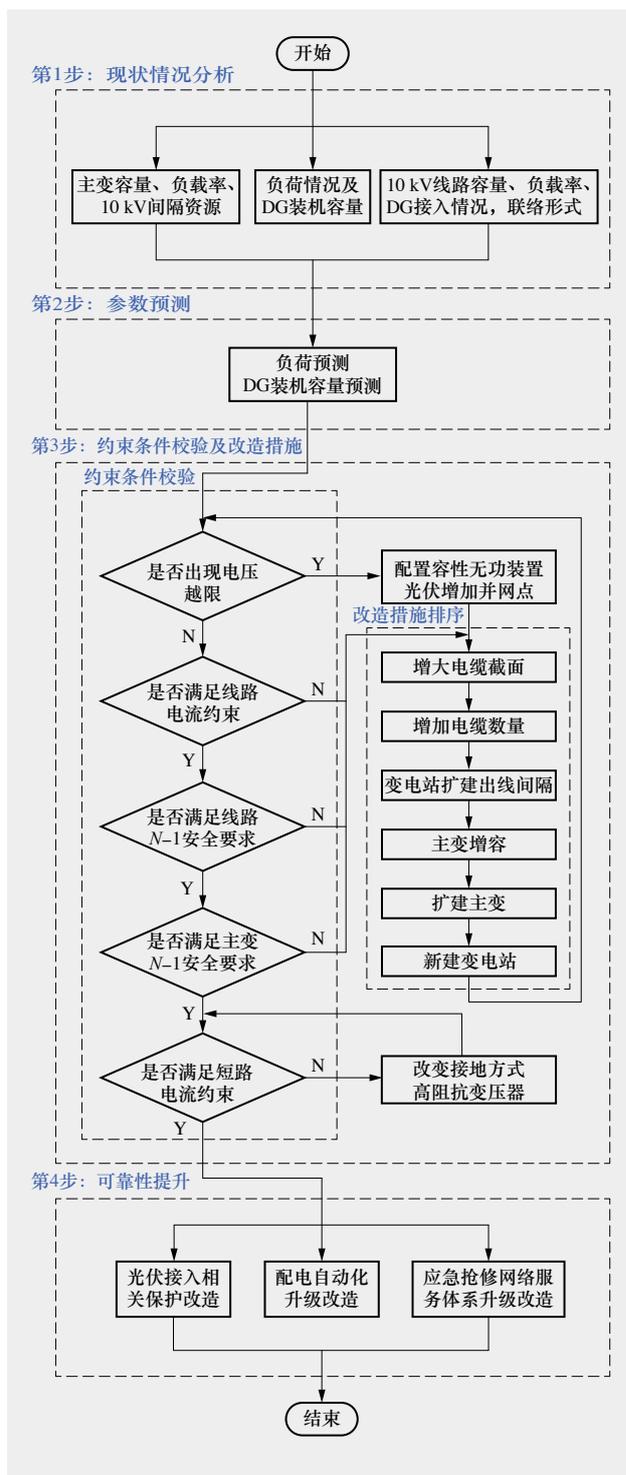


图3 考虑分布式光伏消纳配电网规划流程

Fig.3 Flow chart of distribution network planning considering PV integration

2 现状分析

2.1 地区电网概况

北京地区为典型的受端电网,地方及自备电厂容量较小,受电比例高^[22]。城区10 kV配电网主要采用

电缆单环网或放射式接线，局部采用双环网接线形式。北京电网城市负荷特性鲜明，负荷变化与天气关系密切，呈随机性、波动性特点^[23]，最大负荷出现在每年夏季，日最大峰谷差率最高达67.3%；接入配电网的分布式光伏装机容量一般为几千瓦至几百千瓦，安装于居民住宅或办公楼楼顶，并网电压为380 V，运行方式为发自自用，余电上网。图4为2017年、2018年某供电区域最大负荷典型日曲线。

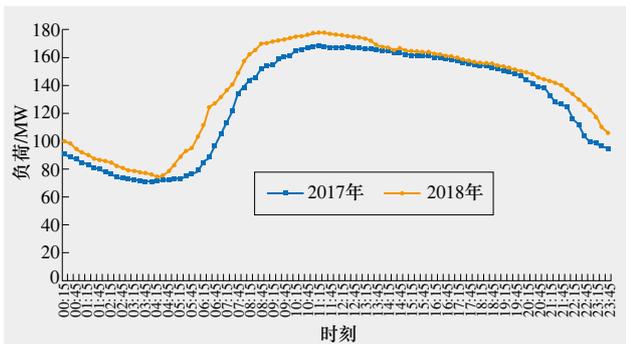


图4 2017年、2018年某供电区域最大负荷典型日曲线
Fig.4 Curve of maximum load in a typical day of a power supply area in 2017 and 2018

随着电动汽车保有量的迅速增加，大量电动汽车的无序充电也带来了负荷峰值的增加。

2.2 典型区域配电网分析

北京城区共分为5个供电区，依次命名为area1至area5，其中area3位于城市中心，负荷密度最高。为了更具有直观性，本文选取area3中某个典型区域开展10 kV配电网的分析和规划。该供电区域目前为A类供电区，根据负荷预测，到规划年度内达到A+类供电区。A+类供电区对电压和供电可靠性高于其他供电区，在大型城市中，这类区域普遍存在，而且是最重要的区域。

所选区域面积5.23 km²，含4座变电站，12台主变，总容量为789 MVA，共76回出线；区域内包含4个分布式光伏并网点，总装机容量为98.7 kW。10 kV线路全部采用电缆，包括10个单环网和1个双环网，馈线联络关系见图5。

该区域电网详细数据见表1，每条联络线的容量为11.285 MVA。最大日负荷为179.281 MVA，馈线平均负载率为23.787 9%，主变平均负载率24.706 6%。

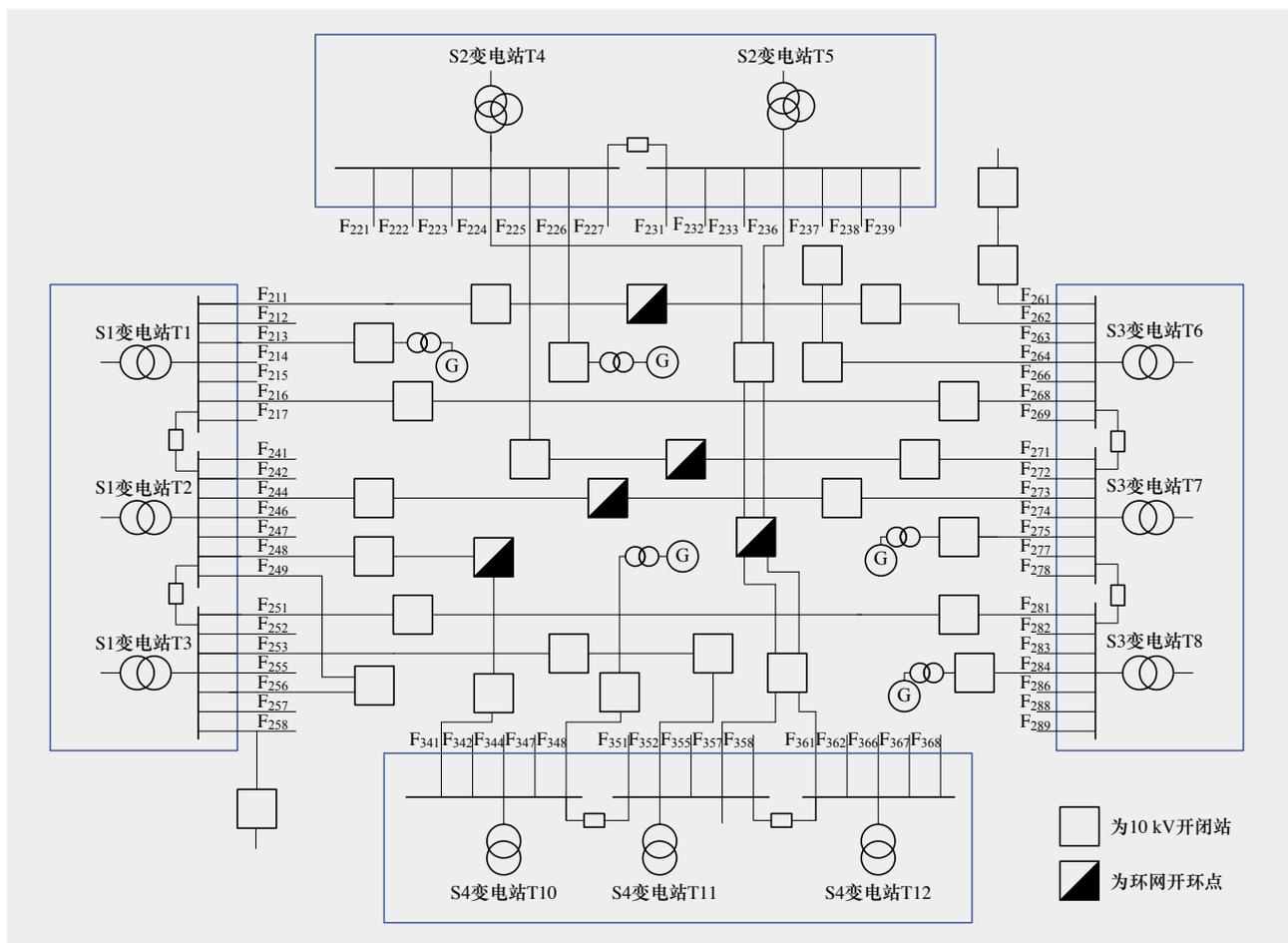


图5 某典型区域10 kV馈线联络关系
Fig.5 10 kV feeders connection diagram of a typical region

表1 变电站10 kV侧主变、馈线及DG装机容量

Table1 The capacity of transformers, feeders and installed DG at 10 kV side of substations

变电站	变压器	变比/kV	主变容量/MVA	馈线总容量/MVA	DG装机容量/kWp	编号
S1	T1	110/10	63	64.950	18.8	T1
	T2	110/10	63	75.342	0	T2
	T3	110/10	63	73.610	0	T3
S2	T4	220/110/10	125	62.750	42.3	T4
	T5	220/110/10	125	63.616	0	T5
S3	T6	110/10	50	76.208	0	T6
	T7	110/10	50	75.342	9.4	T7
	T8	110/10	50	74.476	28.2	T8
	T10	110/10	50	53.692	0	T10
	T11	110/10	50	54.558	0	T11
	T12	110/10	50	32.042	0	T12

正常运行条件下,区域内变压器最大负载率低于50%,站内变压器10 kV侧通过母线桥进行联络,故障时,负荷可100%通过站内主变进行转带,即主变满足N-1要求;10 kV电缆网环网接线形式在规划初期即已考虑N-1要求,严格限制负荷接入量,现状满足N-1要求,放射式接线的负荷通过双电源来保证供电可靠性,也满足N-1要求,其余单电源供电负荷暂不满足N-1要求。

2.2.1 电压偏差情况

通过PSASP软件对区域内配电网进行仿真,结果表明,10 kV各节点电压偏差均符合DL/T 5729—2016《配电网规划设计技术导则》中10 kV电压允许偏差为标称电压的±7%的规定。电压降落范围及其比例见表2。其中,电压降落超过5%的节点位于T1至T6的联络线的中间节点,造成电压降落的主要原因是线路较长。

表2 电压降落范围及所占比例

Table2 Voltage drop range and its proportion 单位: %

压降百分数 比例	0~1	1~5	5~7
	56	41	3

2.2.2 电压偏差分析

分布式光伏接入对系统可靠性的影响是双向的,有利方面包括:当系统故障时,具备孤岛运行模式的分布式光伏,通过配电网的重构,除了可以保证当地用户的供电外,还可作为应急电源为其他重要用户供电;当电网电压跌落时,具备低电压穿越能力的分布式光伏,通过向电网提供无功功率,支持电网的恢复。不利方面包括:系统故障情况下,分布式光伏采用与电网解列的运行方式时,会加剧系统暂态功率不平衡;另外,根据Q/GDW10370—2016《配电网技术导则》的规定,接有分布式电源的配电变压器台区,不得与其他台区建立低压联络,降低所带负荷的供电可靠性。

2.2.3 极端场景应对能力分析

配电网应对极端场景的能力受电网本身结构特性和灾后应急抢修两方面的影响。

首先,相比于传统电网,分布式电源的接入改变了原有配电网电源单一性的缺点;同时,分布式电源具有启停机方便、操作简单灵活的特点,在极端场景下能够进行快速响应。电动汽车既是一种负荷,同时也是一种灵活的储能装置,极端场景下可为配电网提供有效的电源。

其次,区域内目前形成了较为完善的应急抢修服务网络体系,包括:市级调控指挥中心、区县调控指挥分中心、变电站智能监控中心及开闭站、配电室应急抢修服务网点,还包括遍及各区县的中转库和仓储配送网络,五环内应急抢修到达现场时间不超过30 min;设备方面,除了常规应急发电车外,增加了移动式储能电源车、移动式变电站。整体而言,在物资和人力方面基本可以应对电网的严重事故。

3 负荷及光伏装机容量预测

3.1 负荷预测

北京地区“十三五”期间负荷年均增长率为4.4%;电量年均增长率为3.95%。城区5个供电区2020年及2030年负荷、用电量预测值见表3。

表3 城区负荷及用电量预测

Table3 Prediction of load and power consumption in 2020 and 2030 in urban area

规划区域	2020年		2030年	
	最大负荷/ MW	用电量/ 亿kWh	最大负荷/ MW	用电量/ 亿kWh
area1	3 936	201	5 878	255
area2	453	23	676	30
area3	2 908	150	4 343	184
area4	4 526	232	6 758	292
area5	2 134	109	3 187	144

3.2 光伏装机容量预测

各供电区2018年光伏装机容量以及2020年、2030年预测值见图6。

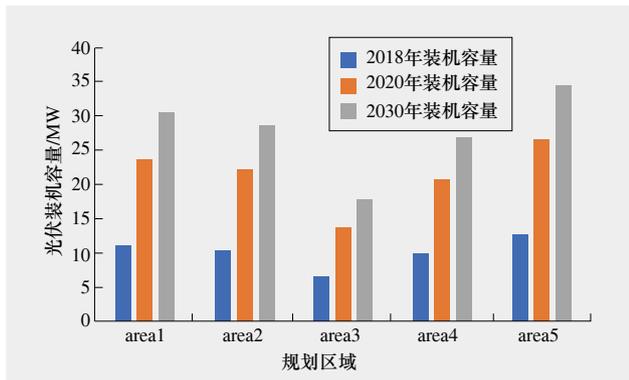


图6 各供电区2018年光伏装机容量以及2020年、2030年预测值

Fig.6 PV installed capacity in 2018 and prediction value in 2020 and 2030 of each power supply area

area3由于面积远小于其余4个区，截止到2018年年底，总装机容量为6.5 MW，且增长率及预测年度总装机容量低于其他区域。

4 规划实例

4.1 典型区域规划方案

根据供电区域所处位置及负荷密度，到2030年该区域达到A+供电区。以双环网作为目标网架结构，分布式光伏采用小容量多布点方式接入配电网。10 kV馈线联络关系见图7，其中，蓝色实线为规划年度新增10 kV线路，蓝色方框为规划年度新增10 kV开闭站。2030年供电区域规划内容见表4。

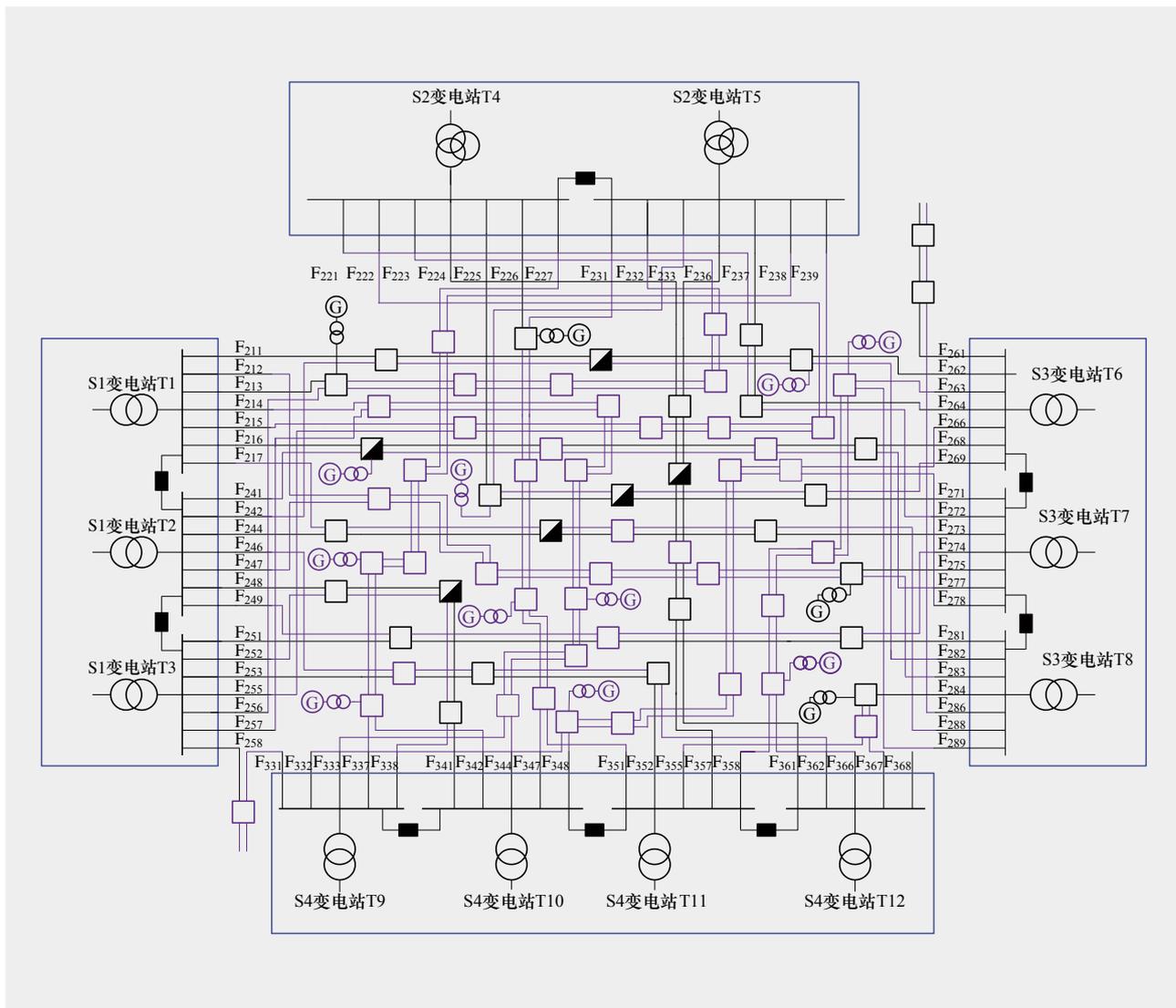


图7 2030年10 kV馈线联络关系

Fig.7 Interconnection relations among 10 kV feeders in 2030

表4 2030年供电区域规划内容

Table4 Planning content of power supply area in 2030

约束条件	规划方案
主变N-1	扩建主变1台
线路N-1	扩建10 kV出现间隔45个 2条10 kV电缆线路截面由240 mm ² 改造为300 mm ² 增加联络形成双环网10个, 新增双环网8个, 与供电区外联络形成双环网2个
电压约束	新增光伏通过10个并网点并网 6个并网点上级配电变压器配置无功补偿容量为变压器额定容量的30%

4.2 典型区域负荷分析

区域内居民负荷占比为17%, 商业、金融和服务类行业负荷增长较快, 约占70%以上, 其余为行政办公等负荷; 区域内各变电站所带负荷见表5。负荷特点仍然是夏季高峰负荷突出, 同时电动汽车保有量持续上升, 峰谷差进一步加大; 目前正在推进和实施的有序充电项目, 可降低电动汽车充电随机性对电网的不利影响, 在规划年度可进一步推广。

表5 最大负荷及DG装机容量预测数据

Table5 Forecasting of daily summit load and the capacity of installed DG

变电站	额定容量/MVA	2020年			2030年		
		最大负荷/MW	DG装机容量/kW	主变平均负载率/%	最大负荷/MW	DG装机容量/kW	主变平均负载率/%
S1	63×3	69.016	40.42	36.495 0	84.990	52.64	44.940 4
S2	125×2	32.647	89.422	13.023 0	59.227	126.9	23.640 0
S3	50×3	55.486	82.72	36.935 5	76.016	105.28	50.607 1
S4	50×4	37.230	35.3	18.597 4	48.712	45.5	24.333 3

4.3 分布式光伏接入规划

规划年度内接入配电网的分布式光伏仍以学校和居民的屋顶光伏为主。并网点的选择原则满足装机容量不超过上一级变压器额定容量25%^[24], 分布式光伏抬高了并网点的电压, 部分并网点在分布式光伏接入前后电压对比见表6。

表6 分布式光伏接入前后并网点电压标么值对比

Table6 Comparison of unit value of voltage at point of common coupling before and after distributed PV accessing the grid

并网点线路	F213	F226	F275	F284
接入前	0.998 03	0.972 60	0.999 05	0.999 56
接入后	0.998 06	0.972 64	0.999 06	0.999 62

规划年度内电压合格率为100%, 典型区域2030年分布式光伏消纳情况见表7。

表7 典型区域2030年分布式光伏消纳情况

Table7 Distributed PV integration in typical region in 2030

新增装机容量/kWp	渗透率/%	新增并网点/个	电压合格率/%
231.62	0.13	10	100

4.4 光伏接入的实用化保护改造

配电网发生故障时, 除了系统向故障点提供短路电流外, 接入的光伏也向故障点提供短路电流; 传统保护动作只判断故障电流大小, 因此光伏提供的短路电流往往会造成保护的误动作。

通过对保护装置增加方向元件, 并利用变电站母线TV和开关柜内TA提供的电压和电流作为方向元件的输入, 能够解决保护丧失选择性的问题, 其有效性在实际工程和运行中已得到了验证, 简单、经济、易于实现, 具有很强的实用性, 规划期内采用这种改造方案对相关保护进行改造。

4.5 可靠性及应对极端场景能力分析

极端场景应对能力得到进一步提升: 一方面, 相比于现状, 区域内10 kV配电网网架结构全部实现双环网接线形式, 分布式电源接入数量以及电动汽车保有量进一步增加, 使得极端情况下, 电网本身的应对能力得到提升; 另一方面, 对目前的应急抢修服务网络体系进行升级和完善, 从整体上, 能够缩短对极端事件响应的的时间。

5 结语

本文针对我国大型城市配电网未来面临的光伏消纳问题, 给出了实用化的配电网规划方法, 并开展了具体的规划实践, 主要结论如下:

1) 本文给出的规划方法, 将N-1准则和电压偏差作为约束条件, 能够满足大型城市配电网对电压和供电可靠性的要求; 同时对改造方案进行了优先级排序, 兼顾了城市用地紧张的实际问题。

2) 分布式光伏采用小容量多布点方式进行并网,

规划时,考虑光伏的影响进行无功配置,可有效解决电压越限的问题。

3) 规划实例中采用的双环网是可以兼顾配电系统可靠性和实现分布式电源灵活消纳的有效接线形式,是未来大中型城市10 kV中压配电网发展中的重要接线形式。

4) 增加方向元件能有效解决由光伏接入后保护丧失选择性问题,保护改造方案简单、经济、易于实现,具有很强的实用性;升级和完善配电网应急抢修服务网络体系是应对极端场景的重要手段。这两方面都可用于提升配电网的供电可靠性。

本文对未来城市配电网的规划和可再生能源消纳具有参考价值。

DU

参考文献

- [1] 于金镒,刘健,徐立,等.大型城市核心区配电网高可靠性接线模式及故障处理策略[J].电力系统自动化,2014,38(20):74-80,114.
YU Jinyi, LIU Jian, XU Li, et al. Distribution grids of high reliability for core areas of large cities [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38 (20): 74-80, 114.
- [2] 侯恺,林主成,贾宏杰,等.可靠性与经济性协调的城市配电网网络优化规划方法[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019,52(12):1293-1302.
HOU Kai, LIN Zhucheng, JIA Hongjie, et al. Optimal planning of urban distribution network tie-line with coordination of reliability and economics [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52 (12): 1293-1302.
- [3] 杨珏,黄慧红,杨柳,等.大面积停电应急抢修兵棋演练系统建模与分析[J].供用电,2020,37(1):80-84.
YANG Jue, HUANG Huihong, YANG Liu, et al. Modeling and analysis of wargaming drill system for wide-area power outage emergency repairing [J]. Distribution & Utilization, 2020, 37 (1): 80-84.
- [4] 肖峻,龙梦皓,程敏,等.计及变电站低压侧接线的配电网最大供电能力计算与分析[J].电力自动化设备,2018,38(2):18-27.
XIAO Jun, LONG Menghao, CHENG Min, et al. Calculation and analysis of total supply capability of distribution network considering connection mode at low voltage side of substation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38 (2): 18-27.
- [5] 梁伟豪,周潮,涂智豪,等.分布式光伏接入对配电网可靠性影响的快速评估方法[J].供用电,2020,37(2):60-66.
LIANG Weihao, ZHOU Chao, TU Zhihao, et al. Fast evaluation method of the impact of distributed photovoltaic access on the reliability of distribution network [J]. Distribution & Utilization, 2020, 37 (2): 60-66.
- [6] ZHAO B, XU Z, XU C, et al. Network partition-based zonal voltage control for distribution networks with distributed PV systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9 (5): 4087-4098.
- [7] 赵毅,刘莉,王刚.光伏电源并网对配电网电压和网损影响的研究[J].电气开关,2012,50(1):17-20.
ZHAO Yi, LIU Li, WANG Gang. Study on the impact of photovoltaic power network-connected on voltage and power loss of distribution networks [J]. Electric Switchgear, 2012, 50 (1): 17-20.
- [8] 陈炜,艾欣,吴涛,等.光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J].电力自动化设备,2013,33(2):26-32.
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid connected photovoltaic system on power network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33 (2): 26-32.
- [9] 杜洪燕.分布式光伏并网对配电网网损的影响及对策[D].济南:山东大学,2018.
- [10] BEGOVIC M M, KIM I. Distributed renewable PV generation in urban distribution networks [C] //Power Systems Conference and Exposition (PSCE). 2011 IEEE/PES. 2011.
- [11] 汪宁渤,马明,强同波,等.高比例新能源电力系统的发展机遇、挑战及对策[J].中国电力,2018,51(1):29-35,50.
WANG Ningbo, MA Ming, QIANG Tongbo, et al. High-penetration new energy power system development: challenges, opportunities and countermeasures [J]. Electric Power, 2018, 51 (1): 29-35, 50.
- [12] 苏小玲,韩民晓,赵正奎,等.配电网中分布式电源最大准入容量分析[J].电网技术,2012,36(10):87-92.
SU Xiaoling, HAN Minxiao, ZHAO Zhengkui, et al. Research on maximum capacity of grid-connected distributed generation in distribution network [J]. Power System Technology, 2012, 36 (10): 87-92.
- [13] 范元亮,赵波,江全元,等.过电压限制下分布式光伏电源最大允许接入峰值容量的计算[J].电力系统自动化,2012,36(17):40-44.
FAN Yuanliang, ZHAO Bo, JIANG Quanyuan, et al. Peak capacity calculation of distributed photovoltaic source with constraint of overvoltage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36 (17): 40-44.
- [14] 任洪伟,韩丛英,裴玮,等.基于多目标优化模型的分布式电源选址方案研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(24):64-69.
REN Hongwei, HAN Congying, PEI Wei, et al. Research on distributed generation locating based on multi-objective optimization model [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41 (24): 64-69.
- [15] 刘佳,徐谦,程浩忠,等.考虑N-1安全的分布式电源多目标协调优化配置[J].电力自动化设备,2017,37(7):84-92.
LIU Jia, XU Qian, CHENG Haozhong, et al. Multi-objective coordinated DG planning with N-1 security [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37 (7): 84-92.
- [16] 吴鸣,于辉,熊雄.分布式电源接入配电网的基本原则[J].供用电,2017,34(12):32-38.
WU Ming, YU Hui, XIONG Xiong. Basic principles for integration of distributed generation into power distribution network [J]. Distribution & Utilization, 2017, 34 (12): 32-38.
- [17] 孙芊,王倩,杨利萍.针对分布式接入的配电网改造方法[J].电力系统及其自动化学报,2014,26(5):60-65.
SUN Qian, WANG Qian, YANG Liping. Reconstruction method of distribution network with access of distributed photovoltaic power [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26 (5): 60-65.
- [18] 肖峻,张宝强,李敬如,等.基于安全边界的高渗透率可再生能源配电网规划研究思路[J].电力系统自动化,2017,41(9):28-35.
XIAO Jun, ZHANG Baoqiang, LI Jingru, et al. Security boundary based research idea on planning of distribution networks with high renewable penetration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41 (9): 28-35.
- [19] 曹哲,刘波,袁智强.高密度分布式光伏发电系统接入配电网准入容量研究[J].电网与清洁能源,2014,30(11):118-122.
CAO Zhe, LIU Bo, YUAN Zhiqiang. Research on the maximum penetration level of multiple distributed PV generation [J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30 (11): 118-122.
- [20] 柴园园,郭力,王成山,等.含高渗透率光伏的配电网分布式电压控制[J].电网技术,2018,42(3):738-746.
CHAI Yuanyuan, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Distributed

voltage control in distribution networks with high penetration of PV [J]. Power System Technology, 2018, 42 (3): 738-746.

- [21] XIAO Jun, ZU Guoqiang, GONG Xiaoxu, et al. Model and topological characteristics of power distribution system security region [EB/OL]. [2014-01-16]. <http://www.hindawi.com/journals/jam/2014/327078/>.
- [22] 国网北京市电力公司. 北京市电力公司2013年电网规划滚动优化调整研究报告 [R]. 2013.
- [23] 崔艳妍, 赵杨, 李勤, 等. 北京地区居民住宅负荷特性研究 [J]. 电气应用, 2014, 33 (20): 36-39, 101.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 光伏发电接入配电网设计规范: GB/T 50865—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.

收稿日期: 2021-07-15; 修回日期: 2021-08-10

作者简介:

贺国伟 (1987—), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事智能配电系统规划与运行研究。

肖峻 (1971—), 通信作者, 男, 博士, 教授, 从事智能配电系统规划与运行研究。

曹加胜 (1982—), 男, 硕士, 工程师, 从事供电规划与设计工作。

Planning Practice of Large Urban Distribution Network Considering Distributed Photovoltaic Consumption

HE Guowei^{1,2}, XIAO Jun¹, CAO Jiasheng²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China; 2. Beijing Electric Power Economic Research Institute Co., Ltd., Beijing 100055, China)

Abstract: Aiming at the problem of photovoltaic (PV) consumption in large-scale urban distribution network in the future, the power supply region within the urban area of Beijing is taken as an example, and the practice of urban distribution network planning considering distributed PV consumption is carried out. Firstly, according to the planning constraints, the network planning method considering distributed PV consumption as well as transformation schemes with priority order are proposed; secondly, the planning practice is taking out, the network current situation of the distribution network is combed, the photovoltaic consumption is analyzed, combined with the prediction of both load and PV install capacity, the network planning of the city in 2030 is proposed, and the transformation scheme of protection and establishment of emergency repairing service network system is given. Finally, this paper summarizes the planning suggestions of large-scale urban distribution network considering PV consumption. For the distribution network planning of large cities, this paper has reference value in the following aspects, influence of PV on voltage and power supply reliability, the transformation scheme of protection after PV accessing and the adaptability of conventional network structure.

Key words: distribution network; PV consumption; voltage; power supply reliability; network structure

(上接第 25 页 continued from page 25)

Active Distribution Network Expansion Planning Considering the Demand Response Characteristics of Industrial Aggregation Districts

JU Shangchun¹, ZHANG Wen², WANG Liang³, SUN Wei³, WANG Hongwei³, LI Changcheng¹

(1. Guangxi University, Nanning 530000, China; 2. Economic & Technology Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Supply Company, Jinan 250000, China, 3. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250000, China)

Abstract: With the increasing permeability of distributed generators (DG) in the distribution network, the traditional distribution network is gradually transforming into the active distribution network. This paper studies the expansion planning of distribution networks in industrial agglomerations with high penetration of distributed power sources, mainly considering the demand response characteristics of industrial aggregation districts. Firstly, the energy supply and demand characteristics of industrial districts are analyzed. Then, considering the demand response characteristics of functional blocks in industrial districts, a two-layer planning model of distribution networks with high permeability DGs is formulated. The upper planning layer is used to determine the capacity and the address of DGs as well as the capacity expansion and new construction of the distributed network. The lower operating layer considers the combination of wind power and photovoltaic power generation in a variety of complex operation scenarios, and models the operation constraints of industrial districts participating in the demand response. Finally, a 62-node system of a 20 kV actual distribution network (industrial districts) is used to verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: distribution network planning; active distribution network; distributed generator; complex scene; demand response