



未来配电网的分布式形态及规划方法

赵一男¹, 宋斌¹, 钱振宇², 李顺昕¹

(1. 国网冀北电力有限公司经济技术研究院, 北京 100038; 2. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 随着物联网 (Internet of Things, IoT) 技术的逐渐成熟, 智能终端设备大面积接入是大势所趋, 同时大量分布式电源接入也对配电网架构形成冲击。首先, 研究未来配电网的分布式形态, 提出在集中式和分布式形态间进行转换的配电网设想, 并给出分布式单元评估和划分方法。接着, 研究柔性建模方法, 并将其应用于配电网规划。最后, 通过算例检验了所提的设想。

关键词: 未来配电网; 柔性规划; 分布式形态; 分布式电源

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202106020

0 引言

目前电力系统正处于能源转型的关键时期。分布式电源相关技术的持续发展与当前集中式的大电网结构并不契合, 同时大电网面对小概率高风险 (low probability high impact, LPHI) 事件时保全负荷的应对能力有待进一步提升。微电网是主动配电网的支撑形式, 却又相对独立^[1]。针对可再生能源高度渗透的电力系统, 文献 [2] 提出了元胞电网 (web of cells)^[2] 的概念。在构建综合能源系统的背景下, 电力物联网和坚强智能电网统一于能源互联网, 深度交融^[3]。就结构特征而言, 电力物联网是集中式结构形态电力系统代表^[4]。未来电力系统将由多个元胞组成, 发输配的界限不再明确, 元胞是在一定的电力或地理边界范围内互联的分布式发电机、储能单元及负荷的灵活组合^[5]。当前需要新形态的配电网结构, 既发挥集中式结构的规模经济效益, 又借助分布式电源提高应对 LPHI 事件的能力。

针对含大量分布式电源的配电网规划研究, 重点在于不确定性要素的研究。在电源不确定性建模方面, 文献 [6-10] 针对风光等不确定性发电

方式接入电力系统的规划及运行问题进行了研究, 提出风储系统联合运行、综合效应电力系统规划、不确定性要素统一建模等理论。在资源调控方面, 文献 [11-17] 综合考虑灵活性要素, 建立灵活性评估指标和灵活性规划方案, 将储能作为可调控的灵活性资源进行规划。柔性方法是利用灵活性资源应对不确定性要素的典型方法, 当前对柔性规划方法的研究主要分为两类, 一类是用于多场景筛选, 先用场景缩减技术选择合适的规划场景, 再用传统的规划模型进行计算^[18-22]; 另一类强调对系统内资源的柔性建模, 进而对电网柔性分析和规划。

总的来说, 当前急需新的配电网结构形态, 进一步解决不确定性规划方法产生投资冗余问题。本文建立集中-分布式结构电网的框架, 提出基于分布式结构供电要求的分布式单元划分方法, 通过改进的柔性规划方法, 完成含分布式形态配电网的规划方案设计。

1 含分布式形态的未来配电网

1.1 分布式形态配电网运行模式

本文将未来配电网看作集中式结构和分布式结构并存或相互转化的形式, 即呈现集中-分布式形态。在分布式运行状态下, 不强求各分布式单元完全实现自给自足, 按照重要负荷优化供电、最大化供电以及就近原则进行负荷之间的取舍。

收稿日期: 2021-06-17; **修回日期:** 2022-03-09。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (基于互逆映射对偶性的电力网络方程多解和可解性问题研究, 51777121); 国网冀北电力有限公司科技项目 (未来配电网的分布式形态及规划方法研究, B3018 F20000 D)。



对于电源侧可控资源，微型燃气轮机为配电台区内的常规电源，分布式光伏和分布式风电为台区内的新能源。微型燃气轮机属于完全可控的范畴。分布式光伏和分布式风电由外部环境决定最大发电量，可控部分为发电设备上网功率。

未来配电网的理想状态是：在正常状态和紧急状态下，各分布式单元实现频率、功率相互支撑。在严重故障时分解为多个能在短时间内独立自主的分布式单元。由于目前相关技术限制以及减少投资冗余的考虑，系统以保障重要负荷供电为目标，根据故障发生时的实际情况选取分解点。本文的研究重点在于未来配电网的体系架构以及规划方法。

1.2 分布式单元供电能力评估

未来配电网实现的重要环节是完成最低一级分布式单元划分。根据负荷类型、储能、分布式电源等情况，以自治水平和保障重要负荷的优先供电的能力进行评估划分，评价指标如下。

可再生能源容量占比为

$$\sigma_{Ei} = \frac{\sum_{j \in \theta_{i,pv}, k \in \theta_{i,w}} (S_{PVj} + S_{Wk})}{\sum_{j \in \theta_{i,pv}, k \in \theta_{i,w}, l \in \theta_{i,g}} (S_{PVj} + S_{Wk} + S_{Gl})} \quad (1)$$

式中： σ_{Ei} 为第*i*个分布式单元的可再生能源容量占比； S_{PVj} 、 S_{Wk} 、 S_{Gl} 分别为第*j*个光伏设备装机容量、第*k*个风电设备装机容量以及第*l*个燃气轮机装机容量； $\theta_{i,pv}$ 、 $\theta_{i,w}$ 、 $\theta_{i,g}$ 分别为第*i*个分布式单元的光伏机组集合、风电机组集合、燃气轮机机组集合。

重要负荷占比为

$$\sigma_{mLi} = \frac{\bar{P}_{mLi}}{\bar{P}_{Li}} \quad (2)$$

式中： σ_{mLi} 为第*i*个分布式单元的重要负荷占比； \bar{P}_{mLi} 为第*i*个分布式单元的预期重要负荷； \bar{P}_{Li} 为第*i*个分布式单元的预期负荷总量。

源荷匹配占比为

$$\sigma_{sLi} = \frac{\sum_{j \in \theta_{i,pv}, k \in \theta_{i,w}, l \in \theta_{i,g}} (\bar{P}_{PVj} + \bar{P}_{Wk} + \bar{P}_{Gl}) + P_{dmax,i}}{\bar{P}_{Li}} \quad (3)$$

式中： σ_{sLi} 为第*i*个分布式单元的源荷匹配占比； \bar{P}_{PVj} 、 \bar{P}_{Wk} 、 \bar{P}_{Gl} 分别为第*j*个光伏设备预期发电

量、第*k*个风电设备预期发电量以及第*l*个燃气轮机预期发电量； $P_{dmax,i}$ 为第*i*个分布式单元的储能设备最大放电量。

预期重要负荷供电时长为

$$\sigma_{ti} = \frac{S_{SOCi,pre}}{\bar{P}_{mLi} - \sum_{j \in \theta_{i,pv}, k \in \theta_{i,w}, l \in \theta_{i,g}} (\bar{P}_{PVj} + \bar{P}_{Wk} + \bar{P}_{Gl})} \quad (4)$$

式中： σ_{ti} 为第*i*个分布式单元的预期重要负荷供电时长，其在分布式单元内储能设备发电占比较高时具有重要意义； $S_{SOCi,pre}$ 为第*i*个分布式单元的储能预期存储电量。

分布式单元最大电压偏移为

$$\sigma_{Vi} = \max_m |U_{im} - U_{im,set}|, m \in \theta_{i,node} \quad (5)$$

式中： σ_{Vi} 为第*i*个分布式单元的最大电压偏移，可用于评估分布式单元独立运行是否满足运行可靠性要求； U_{im} 为第*i*个分布式单元第*m*个节点的实际电压； $U_{im,set}$ 为第*i*个分布式单元第*m*个节点的额定电压； $\theta_{i,node}$ 为第*i*个分布式单元的节点集合。

分布式单元最大线路负载率为

$$\sigma_{li} = \max_n \frac{P_{in}}{P_{in,set}}, n \in \theta_{i,line} \quad (6)$$

式中： σ_{li} 为第*i*个分布式单元的最大线路负载率； P_{in} 为第*i*个分布式单元第*n*条线路的实际传输有功功率； $P_{in,set}$ 为第*i*个分布式单元第*n*条线路的允许传输有功功率； $\theta_{i,line}$ 为第*i*个分布式单元的线路集合。

1.3 分布式单元划分方法

本文目标函数为

$$\max(N + \bar{\sigma}_{sL}) \quad (7)$$

式中： N 为分布式单元总数； $\bar{\sigma}_{sL}$ 为分布式单元源荷匹配比例的平均值。

节点电压约束为

$$\sigma_{Vi} \leq \Delta U_{set}, i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

式中： ΔU_{set} 为规定的节点电压最大偏移。

线路容量约束为

$$\sigma_{li} \leq 100\%, i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

预期重要负荷供电时长约束为

$$\sigma_{ti} \geq T_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

式中： T_i 为规定的重要负荷最低供电时长。

分布式单元负荷规模约束为



$$k_{s,\min} \frac{\bar{P}_L}{N} \leq \bar{P}_{Li} \leq k_{s,\max} \frac{\bar{P}_L}{N}, i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

式中： \bar{P}_L 为配电网预期负荷总量； $k_{s,\min}$ 、 $k_{s,\max}$ 分别为分布式单元负荷规模的最小和最大规定比例。

分布式单元源荷匹配比例约束为

$$\sigma_{sLi} \geq k_{sL}, i = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

式中： k_{sL} 为分布式单元源荷匹配比例的最小值。

2 未来配电网柔性规划方法

2.1 柔性建模方法

随着新型电力系统的建设，传统优化建模中采用刚性约束的局限性逐步凸显。当出现特殊情况以及故障时，部分配电线路和网络节点会出现过载和过电压的情形，系统调度人员会在规定时间内恢复该越限运行点至安全位置。因此，在规划中可以考虑当地电网的实际情况，柔性化处理部分约束条件，实现可控资源调节。

文献[23]对电力系统原先数学模型的约束条件进行了柔性处理，柔性指数与柔性区间的设置过于主观，约束条件处理较为随意，一定程度上违背了规划的安全技术导则。本文将柔性建模分为被动柔性和主动柔性，被动柔性用于描述系统的柔性调节需求，主动柔性用于描述系统的调节能力。根据各要素的区间建模可以对约束条件进行改进。这种柔性处理方法是被动要素不确定性的处理和主动要素可控性的最大化利用，是本文柔性规划的基本思想，可用于改进传统的配电网系统规划方法。

对系统中的被动不确定性要素，以柔性指数和柔性区间的形式进行统一建模，柔性区间是被动性要素的误差最大波动范围，即负荷预测或者可再生能源出力预测的最大波动范围，柔性指数是特定场景下合理的被动性要素误差波动系数，2项参数是根据历史数据以及资金允许的经济情况决定的，被动柔性指数越大，意味着要应对的系统不确定性越强。

根据对可再生能源发电机组出力不确定性的柔性建模，本文改进了常规配电网规划数学模型的约束条件，具体如下。

可再生能源发电机组功率上限约束为

$$G_{ri}(t) + \Delta G_{ri}(t) \leq G_{ri}^{\max} - \alpha_r p_{ri} \quad (13)$$

式中： $G_{ri}(t)$ 为时刻 t 节点 i 处可再生能源发电机组的上网功率， $\Delta G_{ri}(t)$ 为时刻 t 节点 i 处可再生能源发电机组的弃置功率(弃风、弃光等)； G_{ri}^{\max} 为可再生能源发电机组发电功率上限； α_r 为可再生能源发电机组预测上网功率的被动柔性指数； p_{ri} 为可再生能源发电机组预测上网功率的柔性区间。

发电比例约束为

$$\sum (G_{ri}(t) - \alpha_r p_{ri}) \geq R_{\min} \sum (P_j(t) + \alpha_L p_{Lj}) \quad (14)$$

$$\sum (G_{ri}(t) + \alpha_r p_{ri}) \leq R_{\max} \sum (P_j(t) + \alpha_L p_{Lj}) \quad (15)$$

式中： R_{\min} 、 R_{\max} 分别为政策允许的可再生能源发电渗透率上、下限； $P_j(t)$ 为时刻 t 节点 j 处的负荷功率。 α_L 为负荷功率的被动柔性指数； p_{Lj} 为节点 j 的最大负荷预测误差。

根据负荷不确定性和可再生能源发电机组出力不确定性，考虑原有的电量平衡约束，本文新建电量充裕约束为

$$\sum_{i \in \theta_L} (P_{LN,i}(t) + \alpha_L p_{Li}) \leq \sum_{i \in N_{gk}} (G_{Ti}^{\max}(t) + P_{di}^{\max}(t) + G_{ri}(t) - \alpha_r p_{ri}) \quad (16)$$

式中： $G_{Ti}^{\max}(t)$ 为 t 时刻节点 i 处燃气轮机发电机组的极限发电功率； $P_{LN,i}(t)$ 为节点 i 的负荷预测值； $P_{di}^{\max}(t)$ 为时刻 t 节点 i 处储能极限发电功率； θ_L 为负荷节点集合； N_{gk} 为电源节点集合。

改进的约束条件如下。

燃气轮机机组爬坡约束为

$$-(r_{Ti}^d - \beta_{Tr} p_{Tri}) \Delta t \leq G_{Ti}(t) - G_{Ti}(t-1) \leq (r_{Ti}^u + \beta_{Tr} p_{Tri}) \Delta t \quad (17)$$

式中： r_{Ti}^u 、 r_{Ti}^d 分别为在单位时间段 Δt 内，燃气轮机机组允许的爬坡速率上、下限； β_{Tr} 为燃气轮机机组爬坡速率的主动柔性指数； p_{Tri} 为燃气轮机机组爬坡速率的柔性区间，可以参考历史运行数据确定。

燃气轮机机组功率及支路容量约束分别为

$$G_{Ti,\min} - \beta_T p_{Ti} \leq G_{Ti}(t) \leq G_{Ti,\max} + \beta_T p_{Ti} \quad (18)$$

$$P_{ij}(t) \leq P_{ij,ls} + \beta_{ls} p_{ls} \quad (19)$$

式中： $G_{Ti,\min}$ 为燃气轮机机组允许的功率下限； β_T 为燃气轮机机组的主动柔性指数； p_{Ti} 为燃气轮机机组出力允许的柔性区间； $P_{ij}(t)$ 为时刻 t 节点



i 和节点 j 之间线路的有功功率； β_{is} 为支路容量的主动柔性指数； p_{is} 支路容量的柔性区间。

2.2 未来配电网规划方法

结合未来配电网具有集中式和分布式形态特征的特点，本文对未来配电网进行分布式规划和集中式运行验证，即在初始的分布式单元柔性划分方案的基础上使用柔性方法规划每个分布式单元内的电源和线路，接着进行整体方案的运行可行性验证，然后再使用柔性方法重新选取分布式单元，进行最后的分布式单元运行校验。当存在新增负荷节点或当整体方案运行验证柔性水平不达标时，需要对配电网整体网架进行柔性规划。本文建立的双层柔性规划模型如图 1 所示。本文通过非网络解模型优化并筛选最恶劣运行场景，再利用网络解模型求解规划方案，含分布式单元的未来配电网规划流程如图 2 所示。

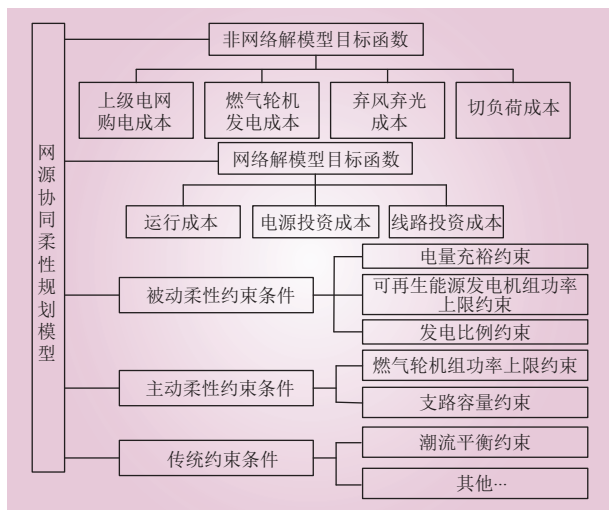


图 1 双层柔性规划模型

Fig. 1 Bilevel planning model considering flexibility

3 算例分析

以修改的文献 [24] 中配电网测试系统作为未来配电网案例，电压等级为 10 kV，网架结构如图 3 所示。系统共有 3 条馈线、108 个节点，线路传输功率上限统一设置为 1.5 MW，总负荷为 7.774 MW，存在 21 个分布式光伏电源、4 个容量为 100 kV·A 的分布式风电电源、2 个装机容量为 1 MW 的燃气轮机机组，系统内有 2 个 0.5 MW/2 MW·h 的电动汽车充电站和 2 个参数为

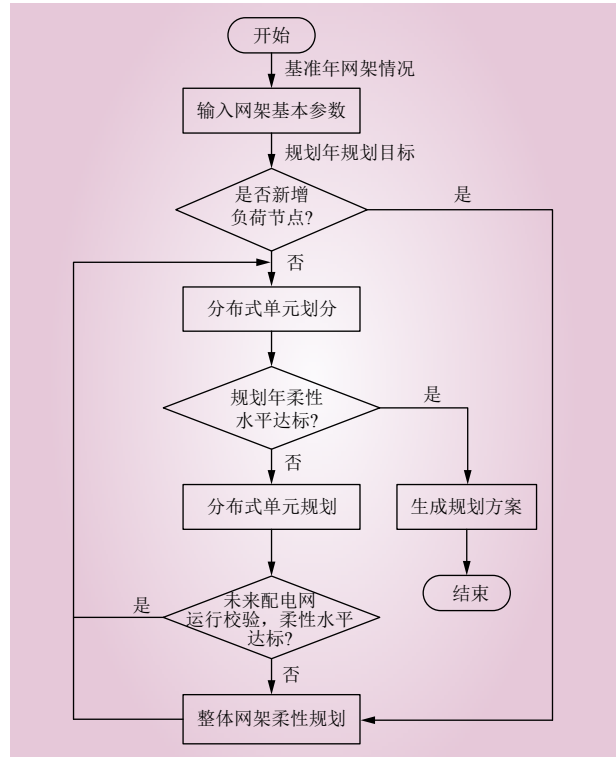


图 2 未来配电网规划流程

Fig. 2 The planning process of futures distribution network

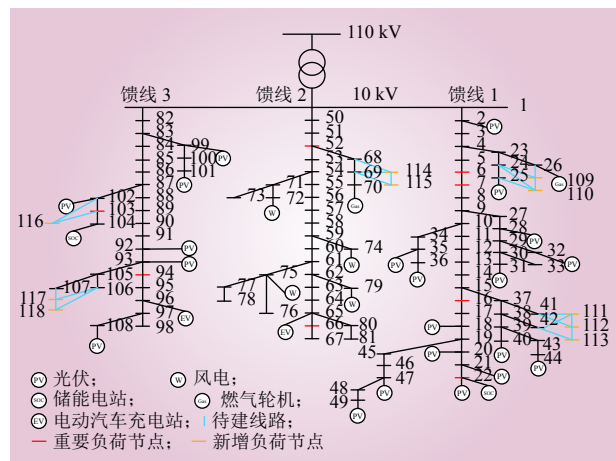


图 3 未来配电网规划算例拓扑

Fig. 3 Topology diagram of future distribution network planning example

1 MW/4 MW·h 的储能电站，以上电源均按功率因数 0.95 处理。设置标准电价为 0.7426 元/(kW·h)，假设年负荷增长率为 5%，折现率为 7%，规划 10 年后的算例网架和电源 (计算资产回收系数为 0.142)，因要提高分布式单元完全可控供电能力，只对微型燃气轮机机组进行选址定容规划。

根据某地区风光发电以及负荷数据，设置 12 个运行场景，分别为一年内不同月份的典型日，每个典型日作为 24 h 处理，考虑柔性指数时，假设被动要素实际值均值为预测值、方差为预测值的 5% 的正态分布，这样设置被动柔性区间为预测值的 10%，当被动柔性指数为 1 时，满足超过 95% 的概率情形，假设主动柔性极限为原极限值的 10%。在完成新建线路规划后，划分分布式单元，结果如图 4 所示。各分布式单元参数如表 1 所示。

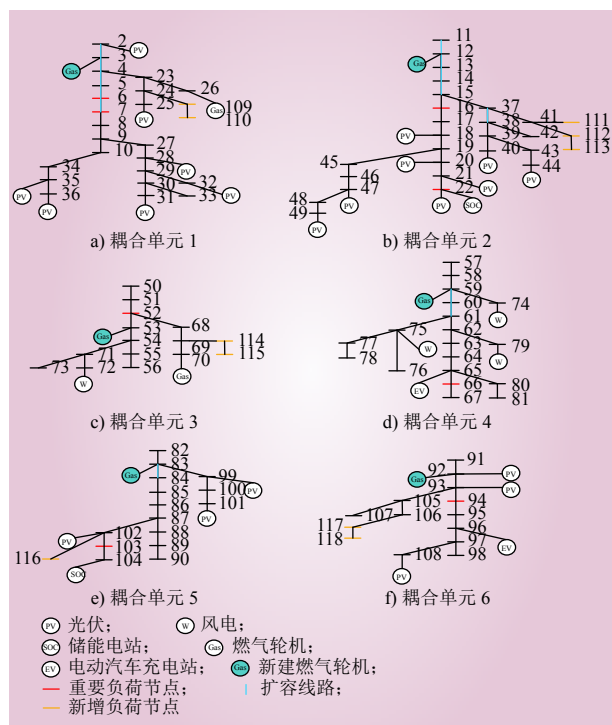


图 4 各分布式单元规划方案
Fig. 4 Planning schemes of dispatching units

表 1 各分布式单元规划方案参数比较
Table 1 Comparison of basic parameters of coupling units' planning schemes

分布式单元	新建电源容量/MW	可再生能源容量占比/%	线路平均负载率/%	源荷匹配占比/%	投资成本/万元
单元1	2.137 9	9.38	12.21	52.49	1 336.2
单元2	3.423 6	12.74	17.02	61.77	2 118.1
单元3	2.258 7	26.82	9.07	64.89	1 443.3
单元4	2.046 9	59.73	12.18	63.05	1 308.0
单元5	2.516 3	47.59	12.79	75.26	1 607.9
单元6	1.509 6	49.77	13.70	52.04	964.6

选取负荷总量最大的单元 2 进行柔性规划分析，不同优化方法求解的规划方案如图 5 所示。从图 5 中可以看出，当考虑不确定性情形相同时，新建的燃气轮机发电机组电源选址基本集中在节点 11、12 处，线路扩容方案相近，一定程度上表明不同优化方法的优化方向一致，说明了本文提出的柔性方法的有效性。

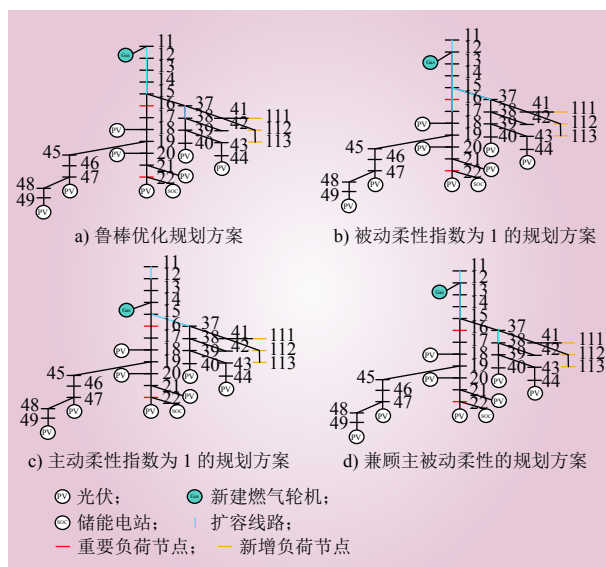


图 5 单元 2 规划方案
Fig. 5 Planning schemes of unit 2

采用不同优化方法，调节被动柔性指数 α 和主动柔性指数 β 的规划方案成本以及相关运行参数如表 2 所示。由表 2 中可知，在可再生能源发电比例方面，鲁棒优化方案最低，在线路负载率方面，除被动柔性优化方案扩容线路较多，线路平均负载率最低以外，主动柔性优化方案由于发电总量最少，线路平均负载率最低。源荷匹配比例指标都超过规定的 50%。当考虑满足超过 95% 的不确定性情形时，柔性优化方案新建电源容量较

表 2 单元 2 规划方案参数比较
Table 2 Comparison of basic parameters of unit 2's planning scheme

规划方案	新建电源容量/MW	可再生能源发电比例/%	线路平均负载率/%	源荷匹配比例/%	投资成本/万元
鲁棒优化	3.676 8	8.30	18.62	62.15	2 349.9
$\alpha=1$	3.566 9	12.42	16.56	57.86	2 279.8
$\beta=1$	3.242 6	13.88	16.80	66.77	2 077.9
柔性优化	3.423 6	13.18	17.02	61.77	2 188.1

低，总投资成本较低，说明了柔性优化方法相比传统鲁棒优化经济性更好，能起到延缓投资的效果。

对比被动柔性优化方案和鲁棒优化方案，基于电量充裕约束，被动柔性优化方案成本更低，而主动柔性优化方案由于柔性调节能力最强，投资成本最低，而兼顾主被动柔性的优化方案投资成本适中。

对配电网整体网架进行运行验证分析，求解得网架柔性水平不达标，进一步进行网架规划，由于仅进行了线路扩容规划，分布式单元划分方案不变，检验柔性水平达标，最终规划方案如图 6 所示。

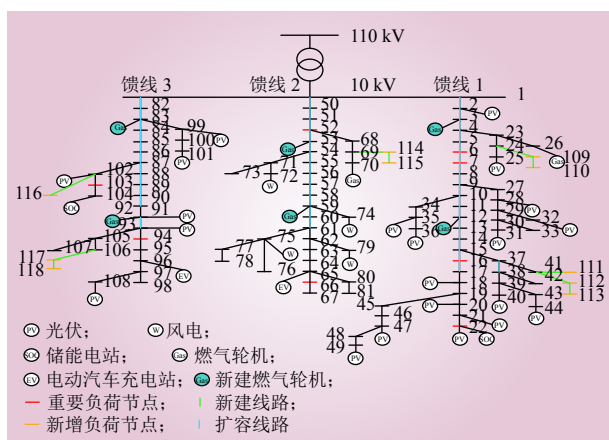


图 6 未来配电网最终规划方案

Fig. 6 Final planning scheme for future distribution network

最终规划方案加固了 3 条主馈线，此时未来配电网在正常状态下能够整体良好运行，说明了规划方案的有效性和可行性。此时场景中的各类电源、储能设备出力情况如图 7 所示。

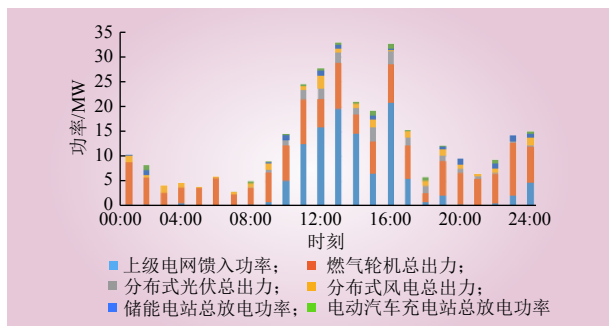


图 7 各类电源、储能设备出力情况

Fig. 7 Output of various power units and energy storage equipment

由图 7 可知，在 01:00–08:00，负荷总需求较低，此时优先考虑由配电网内可再生能源供电，由于风力和光照情况，该时间段供电主体为配电网内的微型燃气轮机机组；而在 10:00–17:00，负荷总需求较高，需要上级电网馈入功率的额外补充。同时，在该配电网中，储能电站和电动汽车充电站有一定的削峰填谷作用。总的来说，该调度方案展现了未来配电网整体运行时在恶劣场景下有效调配各类电源及储能设备的能力。

4 结语

本文研究的未来配电网的分布式形态及柔性规划方法，符合分布式电源、电动汽车等电力系统新要素的发展趋势，是未来配电网分布式结构形态的设想。本文提出的未来配电网分布式形态在应对 LPHI 事件时，可以分解为各分布式单元，有效保障负荷需求，能有效针对含大量分布式电源的配电网进行规划。对未来配电网分布式形态控制层面的研究是下一步的主要工作。

参考文献：

- [1] SINGH P, LATHER J S. Power management and control of a grid-independent DC microgrid with hybrid energy storage system[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 43: 100924.
- [2] MARTINI L, MORCH A, RADAELLI L, et al. Electra IRP approach to voltage and frequency control for future power systems with high der penetration [C]//23rd International conference on electricity distribution. Geneva: CIRED, 2015.
- [3] 杨挺, 翟峰, 赵英杰, 等. 泛在电力物联网释义与研究展望 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(13): 9–20, 53.
YANG Ting, ZHAI Feng, ZHAO Yingjie, et al. Explanation and prospect of ubiquitous electric power Internet of Things[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(13): 9–20, 53.
- [4] 国家电网有限公司. 全面部署泛在电力物联网建设 [EB/OL]. (2019-04-16)[2020-08-15]. [http://h5 ip.cn/ozf/](http://h5.ip.cn/ozf/).
- [5] 宋慧慧, 于国星, 曲延滨, 等. Web of cell 体系: 适应未来智能电网发展的新理念 [J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(15): 1–9.
SONG Huihui, YU Guoxing, QU Yanbin, et al. Web of cell architecture—new perspective for future smart grids[J]. *Automation*



- of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 1-9.
- [6] 郑静, 文福拴, 李力, 等. 计及风电场和储能系统联合运行的输电系统扩展规划 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 135-142.
ZHENG Jing, WEN Fushuan, LI Li, *et al.* Transmission system expansion planning considering combined operation of wind farms and energy storage systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(1): 135-142.
- [7] 侯慧, 徐焱, 肖振锋, 等. 基于重力储能的风光储联合发电系统容量规划与评价 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 74-84.
HOU Hui, XU Tao, XIAO Zhenfeng, *et al.* Optimal capacity planning and evaluation of a wind-photovoltaic-storage hybrid power system based on gravity energy storage[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(17): 74-84.
- [8] 余豪杰, 李官军, 杨波, 等. 基于分布式光伏/飞轮储能联合发电系统的并网点电压主动调控技术研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 48-56.
YU Haojie, LI Guanjun, YANG Bo, *et al.* Research on the active control technology of grid voltage based on a distributed photovoltaic/flywheel energy storage combined generation system[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(3): 48-56.
- [9] 杨彪, 颜伟, 莫静山. 考虑源荷功率随机性和相关性的主导节点选择与无功分区方法 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 61-67.
YANG Biao, YAN Wei, MO Jingshan. Pilot-bus selection and network partitioning method considering randomness and correlation of source-load power[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(11): 61-67.
- [10] 袁越, 吴博文, 李振杰, 等. 基于多场景概率的含大型风电场的输电网柔性规划 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 8-12.
YUAN Yue, WU Bowen, LI Zhenjie, *et al.* Flexible planning of transmission system with large wind farm based on multi-scenario probability[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2009, 29(10): 8-12.
- [11] 刘万宇, 李华强, 张弘历, 等. 考虑灵活性供需平衡的输电网扩展规划 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 56-63.
LIU Wanyu, LI Huaqiang, ZHANG Hongli, *et al.* Expansion planning of transmission grid based on coordination of flexible power supply and demand[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(5): 56-63.
- [12] WANG J F, ZHANG H H, ZHU F Y. Evaluation of power system flexibility based on the typical scene set[C]//2021 4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering. Chongqing: CEEPE, 2021: 638-642.
- [13] HOU L, CHEN Y H, SU K, *et al.* Research on Bi-level planning method of active distribution network considering flexible interconnection of source network load and storage[C]//2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference. Beijing: ISPEC, 2019: 45-49.
- [14] 江千军, 王磊, 桂前进, 等. 考虑多时间尺度灵活性的含大规模风电电力系统机组组合研究 [J]. 智慧电力, 2021, 49(1): 35-41, 70.
JIANG Qianjun, WANG Lei, GUI Qianjin, *et al.* Power system unit commitment with large-scale wind power considering multi-time scale output flexibility[J]. *Smart Power*, 2021, 49(1): 35-41, 70.
- [15] 郭然龙, 邢海军, 谢宝江, 等. 计及灵活性供需的多场景分布式电源双层规划 [J/OL]. 现代电力: 1-12[2022-03-08]. <https://kns.cnki.net/kns8/defaultresult/index>.
GUO Ranlong, XING Haijun, XIE Baojiang, *et al.* A Bi-level Programming of Multi Scenario Distributed Generation Considering Flexible Supply and Demand[J/OL]. *Modern Electric Power*: 1-12[2022-03-08]. <https://kns.cnki.net/kns8/defaultresult/index>.
- [16] 孙波. 可再生能源发电的电力系统规划与运行方式研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
SUN Bo. Transmission system planning and operation mode considering renewable energy power generation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [17] HEMMATI R, MEHRJERDI H. Investment deferral by optimal utilizing vehicle to grid in solar powered active distribution networks[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 30: 101512.
- [18] 高亚静, 朱静, 程华新, 等. 计及不确定性因素基于多场景的主动配电系统短期供电能力评估 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6076-6085.
GAO Yajing, ZHU Jing, CHENG Huaxin, *et al.* Evaluation on the short-term power supply capacity of active distribution system based on multiple scenarios considering uncertainties[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(22): 6076-6085.
- [19] 王娟娟, 王涛, 刘子茜, 等. 考虑风电和负荷不确定性的输电网多目标柔性规划 [J]. 中国电力, 2022, 55(1): 168-177.
WANG Juanjuan, WANG Tao, LIU Zihan, *et al.* Multi-objective flexible planning of transmission network considering wind power and load uncertainties[J]. *Electric Power*, 2022, 55(1): 168-177.
- [20] 蔡佳铭, 张涛, 王承民, 等. 计及源荷不确定性的主动配电网网架扩展柔性规划 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 109-115.
CAI Jiaming, ZHANG Tao, WANG Chengmin, *et al.* Flexible planning of active distribution network expansion considering source and load uncertainty[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(10): 109-115.
- [21] 高亚静, 李瑞环, 梁海峰, 等. 考虑间歇性电源与负荷不确定性情况



- 下基于多场景技术的主动配电系统两步优化调度 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1657–1665.
- GAO Yajing, LI Ruihuan, LIANG Haifeng, *et al.* Two step optimal dispatch based on multiple scenarios technique considering uncertainties of intermittent distributed generations and loads in the active distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1657–1665.
- [22] 程浩忠, 范宏, 翟海保. 输电网柔性规划研究综述 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(1): 21–27.
- CHENG Haozhong, FAN Hong, ZHAI Haibao. Review of transmission network flexible planning[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Automation, 2007, 19(1): 21–27.
- [23] 孙伟卿, 王承民, 张焰. 考虑输电线路负载率约束和全规划周期柔性成本评估的电网规划方法 [J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2985–2990.
- SUN Weiqing, WANG Chengmin, ZHANG Yan. A power grid planning method considering transmission line load rate constraint and flexible cost evaluation within full planning cycle[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2985–2990.
- [24] 祖文静, 李勇, 谭益, 等. 高渗透率可再生能源配电网测试系统建模与有效性分析 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 45–50.
- ZU Wenjing, LI Yong, TAN Yi, *et al.* Modeling and effectiveness analysis on test system for distribution networks with high penetration of renewable resource[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 45–50.

作者简介:

赵一男 (1984—), 女, 高级工程师, 从事配电网规划与评估、配电网安全经济运行研究, E-mail: friever@163.com;

宋斌 (1991—), 男, 工程师, 从事电力系统规划设计, E-mail: 444973563@qq.com;

钱振宇 (1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 从事配电网规划、电力系统经济运行研究, E-mail: prohsw@126.com。

(责任编辑 杨彪)

Dispatching Architecture and Planning Method of Future Distribution Network

ZHAO Yanan¹, SONG Bin¹, QIAN Zhenyu², LI Shunxin¹

(1. State Grid Jibei Electric Economic Research Institute, Beijing 100038, China;

2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the development of Internet of Things (IoT) technology, the large-scale access of smart terminal equipment is the general trend. At the same time, a large number of distributed generation access also has an impact on the distribution network architecture. This paper first studies the distributed architecture of distribution network in the future and puts forward the idea of distribution network which can transform between centralized form and distributed form. The evaluation and division method of coupling units are given. Then, the method of flexibility modeling is studied and applied to distribution network planning. Finally, an example is given to test the assumption.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (Research on Multiple Solutions and Solvability of Power Network Equations Based on Duality of Reciprocal Mapping, No. 51777121), Science and Technology Project of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. (Research on Dispatching Architecture and Planning Method of Future Distribution Network, No. B3018F20000D).

Keywords: future distribution network; planning method considering flexibility; dispatching architecture; distributed generation