

协调源荷不确定性的配电网扩展规划

蔡佳铭¹, 祝燕萍², 刘波¹

(1. 上海电力设计院有限公司能源(电网)规划中心, 上海 200001; 2. 国网上海市电力公司奉贤供电公司, 上海 201499)

摘要:随着可再生能源、储能在配电网中的应用越来越广泛,亟需开展计及源端、荷端不确定性的配电网扩展规划研究。在此背景下,提出包含三级层次的配电网扩展规划流程和配电网扩展规划随机期望值模型。首先建立以综合新建成本为优化目标,连通性、可靠性、潮流限制等为约束条件的网架扩展规划模型,确定规划新建站点的接入方案和储能配置容量;其次构建运行优化模型,计算正常运行方式下合理的开关组合;最后采取针对性的局部补强措施,结合实际算例系统验证模型的有效性。

关键词:源网荷协调;重过载;优化;扩展规划

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.03.008 中图分类号:TM712 文章编号:1673-9140(2021)03-0067-09

Distribution network expansion planning coordinating source-load uncertainty

CAI Jiaming¹, ZHU Yanping², LIU Bo¹

(1. Shanghai Electric Power Design Institute Co., Ltd., Energy (Power Grid) Planning Center, Shanghai 200001, China;

2. State Grid Fengxian Electric Power Supply Company, Shanghai 201499, China)

Abstract: With the increasing application of renewable energy and energy storage in the distribution network, there is an urgent need to carry out research on the expansion planning of the distribution network that takes into account the uncertainties of the source and load ends. This paper proposes a three-level distribution network expansion planning process and a random expected value model for distribution network expansion planning. Firstly, a network framework expansion planning model is established with comprehensive new cost as the optimization goal, connectivity, reliability, and power flow restrictions as constraints. As a result, the planned access plan and energy storage configuration capacity for the new site are determined. Secondly, the operation optimization model is established to calculate reasonable switch combination in normal operation mode. Finally partial reinforcement measures are adopted to improve system reliability. The validity of the model is verified in a practical system example.

Key words: coordination of source-network-load; overload; optimization; expansion planning

随着配电网规划精益化水平的不断提升,高效且科学的配电网扩展规划方案设计变得日益重要^[1]。该文研究了考虑源网荷相协调的配电网扩展规划问题(distribution expansion planning, DEP),

确定配电网扩展方案的总体原则:在现状网架的基础上,基于负荷预测结果,配合开发与建设时序,一方面采取针对薄弱环节的临时或根本性补强措施,另一方面结合远景网架接线方案,设计不同阶段的接线形式,最终实现逐步向远景目标网架过渡^[2]。如何在充分匹配远景目标网架的基础上针对现状网架存在的问题开展改造,避免大规模站点、线路重复建设或被拆除,提出优化配置、节约成本、省时高效的规划方案,是一个涉及复杂因素影响工程的实际问题^[3-4]。

现有文献关于配电网扩展规划问题的研究主要集中在网架层面上,而与运行层面问题相结合的研究较少。文献[5]考虑将架空线向电缆网方向过渡的配电网规划;文献[6]考虑配电网网架扩展鲁棒优化。贴合实际的配电网网架扩展规划研究应考虑配电网运行方式对网架规划的影响,对站间负荷优化分配等要素和问题进行建模处理。

目前关于处理不确定性要素的主流方法包括随机规划(stochastic programming, SP)和鲁棒优化(robust optimization, RO)^[7-12]。随机规划依赖不确定性参数的概率分布模型,抽样生成规划场景,随机规划的精度取决于历史统计数据的规模和分布规律准确性。鲁棒优化给出不确定要素的变化范围,提取出理论上最恶劣的规划场景加以研究。文献[7-9]运用随机理论对分布式电源等灵活性资源的出力特性进行量化数学描述;文献[9]建立关于不确定性要素的机会约束模型;文献[10-12]首先提取出边界最恶劣的规划场景,并在此基础上开展鲁棒优化。该文建立随机期望值模型,属于随机规划类方法。较常规方法而言,该文没有精简规划场景或对模型作转化处理,保留了一定数量的原始计算场景,以目标函数期望值为优化目标,提升了规划结果的一般性。

该文针对可再生能源等不确定性要素接入以及配置储能的配电网网络,以总体建设成本和系统网损等经济性目标为优化对象,建立包含上层网架规划、中层运行优化和下层局部补强 3 个规划流程的扩展规划模型。利用随机期望值模型处理计算边界中的不确定性,提升计算结果的精度。结合实际工

程算例检验,说明了该文提出的配电网扩展规划模型和流程的有效性。

1 协调源—网—荷的配电网扩展规划

协调源—网—荷的配电网扩展规划要点包括以下几个方面:源端应考虑电源点的开发时序,规划网架的设计应与电源点接入系统方案(接入阶段、接入位置)相配合;网端应研究在匹配目标网架前提下的现状网架扩展规划方案(包括新建、改建和扩建等);荷端应将负荷预测结果、储能装置的实际运行特性等纳入考虑。该文的主要工作是提出配电网扩展规划方案,将上述源端、荷端开发与建设时序、负荷预测结果、电源接入方案以及远景目标网架接线等作为已知条件和输入边界,通过优化进而实现配电网规划与源、荷影响因素的匹配。

该文首先计算规划阶段新建站点接入系统的方案。一方面要适应当前配电网网架发展的需要,另一方面要与远景目标网架相匹配,即以远景规划的线路廊道上需最终建成的线路回数为参考边界和约束上限,在扩展规划涉及的各过渡阶段结合投资边界和开发情况确定分阶段规划方案,使之尽量贴合远景目标网架。其次在输出扩展规划网架的基础上,调整并确定正常运行方式下的开关状态,也即供电方案。通过优化计算,调整站间、站内的开关状态,得到系统内站点正常运行方式下的合理带载方案,缓解站点负载率不协调、局部偏高的问题。最后结合补强措施进一步降低站点负载率的越限风险。

2 基于随机期望值模型的配电网 3 层规划模型

2.1 整体规划架构与流程

该文提出的 3 层规划模型汇总如表 1 所示。整体规划模型架构如图 1 所示。

上层模型计算出各阶段的网架规划方案;中层模型基于网架结构优化运行方式,确定正常运行方式下的供电方案;经过上层和中层模型优化后,下层模型考虑针对存在潜在越限风险的站点采取补强措施。

表 1 配电网 3 层扩展规划模型汇总

Table 1 Summary of three-layer expansion planning model for distribution network

模型	优化目标	优化变量	考虑约束	规划内容
上层	综合新建成本	在规划阶段决定新建的线路回数、储能配置容量	连通性、可靠性、远景廊道上的回数限制、储能运行条件、电压约束、潮流约束	接入系统方案 (网架规划)
中层	系统网损	正常运行方式下的开关状态	站点负载率约束、储能运行条件、供需平衡、电压约束、潮流约束	运行方式调整 (供电方案)
下层	站点负载率	站点改造措施	降低站点的负载率越限风险、站点是否具备改造条件、移动变库存情况等	局部补强措施

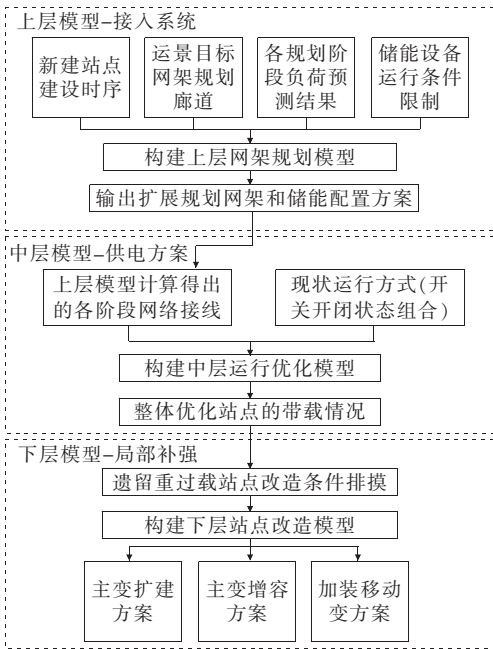


图 1 规划流程

Figure 1 Planning process

2.2 上层网架规划模型

该层模型基于不同规划阶段的负荷预测结果和特性、新建站点的建设时序和可再生能源机组的出力特征,确定配电网网架的扩展规划方案,也即新建站点的接入系统方案。

设共考虑 T 个规划阶段,记规划阶段 $t (t=1, 2, \dots, T)$ 的投产站点(包括现状和新建站)构成的集合为 Φ_t 。上层网架规划模型以各阶段的总建设成本为优化目标:

$$\min C_x = \sum_{t=1}^T (1+r)^{-t} \left[\sum_{i \in \Phi_t} \sum_{\substack{j \in \Phi_t \\ j < i}} c_{ij}^t x_{ij}^t + \beta_{Si} c_s x_{Si}^t \right] \quad (1)$$

式中 上层规划模型的优化目标 C_x 为新建总成本; i, j 均为站点序号; c_{ij}^t 为 t 阶段时站点 i, j 之

间单回规划线路的新建成本; c_s 为配置单位容量储能设施的新建成本; x_{ij}^t 为 t 阶段时站点 i, j 之间规划建设的线路回数; x_{Si}^t 为站点 i 处配置的储能装置容量; β_{Si} 为 $0 \sim 1$ 变量,是反映站点 i 处是否具备储能配置条件的指示性参数,取值为 0 时表示不在站点 i 处规划配置储能,取值为 1 时表示配置储能; r 为折现率。

在某一规划阶段,新建线路回数通常只能取 0、1、2 之中的值,因此需满足:

$$x_{ij}^t (x_{ij}^t - 1) (x_{ij}^t - 2) = 0 \quad (2)$$

各阶段的线路规划方案为新建站点的接入系统方案,任意规划阶段各站点与其余站点均需连通。利用广度优先搜索^[13-15]判断规划方案是否满足连通约束,即各阶段的新站点均已接入系统:

$$f(x_t) = 1 \quad (3)$$

式中 $f(\cdot)$ 为判断网架结构中各点是否连通的函数; x_t 为反映 t 阶段下站点连接关系的邻接矩阵,矩阵 x_t 中的元素为 x_{ij}^t 。

各阶段规划方案同一廊道的新建线路回数总和不能超过远景目标网架的规划总回数:

$$\sum_{t=1}^T x_{ij}^t \leq N_{t-ij} \quad (4)$$

式中 N_{t-ij} 为远景目标网架站点 i, j 之间廊道的线路回数。

各站点的可靠性约束,主要通过新建线路回数约束,对于站点 i :

$$\sum_{\substack{j \in \Phi_t \\ j \neq i}} x_{ij}^t \geq N_E \quad (5)$$

式中 N_E 为站点 i 满足可靠性要求的进出线回路数,对于不同电压等级的站点,可靠性要求不同, N_E 可根据需要取不同的值。

在各规划阶段内分别设置包含 24 个时段(每 1 h

一个点)的计算场景,对于每个时段 s ($s=1,2,\dots,24$),源端考虑风电和光伏 2 类可再生能源机组出力的影响,根据历史出力情况将风电、光伏的出力预测曲线作为计算边界。荷端考虑储能配置需满足的运行约束,即

$$\sum_{s=1}^{24} P_{Si}(s) \Delta s = 0 \quad (6)$$

$$|P_{Si}(s)| \leq \gamma x_{Si} \quad (7)$$

$$Q_{Si,\min} \leq Q_{Si}(s) \leq Q_{Si,\max} \quad (8)$$

$$Q_{Si}(s) = Q_{Si}(s-1) + \eta_s P_{Si}(s) \Delta s \quad (9)$$

式(6)~(9)中 s 为时段; $P_{Si}(s)$ 为时段 s 内储能的充放电功率; Δs 为时段间隔时间; γ 为描述储能充放电功率的上限比例; $Q_{Si}(s)$ 为时段 s 内储能的电量; $Q_{Si,\max}$ 、 $Q_{Si,\min}$ 分别为储能电量的上下限; η_s 为储能效率。

在计及可再生能源机组出力以及储能运行影响的前提下,需满足供需平衡,同时要校验网架的节点电压和网架潮流约束:

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (10)$$

$$S_{ij,\max} \geq S_{ij} \quad (11)$$

此模型以经济性为目标,确定各规划阶段的网架规划和节点储能配置方案。

2.3 中层运行优化模型

在得到网架规划方案的基础上,该层模型考虑通过调整运行方式优化站点的带载情况,将原站点的部分负载向新建站点转移,使得各站点的负载率均处于理想水平。站点的带载情况是由正常运行方式下系统内联络开关、分段开关、刀闸等元件的开闭状态组合决定的。换言之,通过优化计算开关的开闭状态,使得负荷能在全部站点间合理分配。如图 2 所示,对于有母线且母线间有分段开关或母联开关的站点,此时需将单台主变或一段母线作为基本的节点模型建模,否则无法反映开关的状态信息。

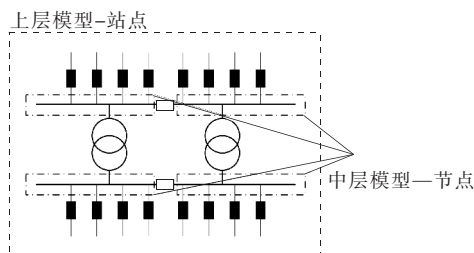


图 2 中层模型节点建模

Figure 2 Modeling of middle model nodes

按照这一原则将各阶段的节点构成的集合记为 Φ_i^* 。任意两节点 i 、 j 间有开关,记开关状态为 x_{ij}^{t*} 。当开关闭合($x_{ij}^{t*}=1$)时,两节点连通,否则两节点不连通。按照现状运行方式确定 x^{t*} 的初值。

在各规划阶段内分别设置包含 24 个时段(每 1 h 一个点)的计算场景,对于每个时段 s ($s=1,2,\dots,24$),通过优化开关组合,计算潮流分布和站点带载情况,使得系统的总网损最小。其模型可表示为

$$\min E_x = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^{24} E_{\text{loss}}(x)_s^t \quad (12)$$

式中 $E_{\text{loss}}(x)_s^t$ 为规划阶段 t 时段 s 场景下的系统总网损; E_x 为总网损; x 为系统内全部开关状态组合的优化变量。对于每一种正常运行方式下的开关组合,都存在对应的潮流分布、站点带载和系统网损。该层模型通过优化开关组合,以网损最小为目标,通过计算得到负荷在新、旧站点间分配的合理方案。

各站点的负载率不能超过上限:

$$\eta_i \leq \eta_{\max} \quad (13)$$

式中 η_i 为站点 i 的负载率,需结合潮流分布和计算过程中的站点带载情况计算; η_{\max} 为站点 i 处允许的负载率上限。

供求平衡约束:

$$P_i^t - P_{Li}^t = U_i \sum_{j \in \Phi_i^*} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (14)$$

$$Q_i^t - Q_{Li}^t = U_i \sum_{j \in \Phi_i^*} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (15)$$

式中 P_i^t 、 Q_i^t 分别为 t 阶段潮流断面上节点 i 的有功、无功注入功率; P_{Li}^t 、 Q_{Li}^t 分别为 t 阶段潮流断面上节点 i 的有功、无功负荷; U_i 为节点 i 电压; G_{ij} 、 B_{ij} 为节点 i 、 j 之间的线路导纳参数; θ_{ij} 为节点 i 、 j 之间的相角差。

电压约束以及潮流不越限约束,尽管形式与上层模型式(10)、(11)相同,但在该层优化计算时的基本节点已经由站点变为站内的母线或主变,且节点数量、优化对象均有区别。

优化运行方式后改变了站点的带载情况,该层模型计算出的结果可为系统调度运行提供有益参考,是对网架规划方案的补充。

2.3 下层局部改造模型

按照中层模型计算的理论规划方案可保证新建站点的负载率满足要求,但在实际运行时某些偏离主网架、附近无新建站点计划的现状站点,可能因负荷发展需要存在潜在的过载风险,此时应考虑对此类站点采取局部补强措施,如扩建主变、主变增容、加装移动变等。实际规划时应结合站点的改造条件、移动变的储备情况等按经济性原则综合考量。

2.4 处理风、光不确定性的随机期望值模型

上层、中层模型规划阶段内的计算场景以风电、光伏的出力为计算边界,由于风电、光伏的出力具有不确定性特征,难以选用准确的典型值或预测值计算,该文建立起处理风、光不确定性的随机期望值模型,将上层、中层模型的目标函数改写为

$$\min E[C_x] \tag{16}$$

$$\min E(E_x) \tag{17}$$

式(16)、(17)中 $E[C_x]$ 、 $E(E_x)$ 分别为目标函数新建总成本和网损的期望值。将确定性规划问题转化为随机期望值模型,上层模型的求解流程示意如图 3 所示。以上层模型为例说明计算步骤:

步骤 1:设置 $E[C_x]$ 的值为 0;

步骤 2:根据风电、光伏出力的历史数据拟合其服从的概率分布,抽样出当前计算场景下 24 个时段的出力数据;

步骤 3:利用该场景的出力边界,求解式(1)~(11)的上层规划模型。上层模型是一个混合整数规划问题,利用式(2)将变量整数约束转化为非线性约束,模型转化为非线性规划问题,潮流按照线性潮流简化计算。为提高求解效率,该文利用外点罚函数法将约束改写为目标函数惩罚项的形式,再利用遗传算法求解,计算结果记为 C_x^{tmp} ;

步骤 4:令 $E[C_x] = E[C_x] + C_x^{tmp}$;

步骤 5:重复步骤 2 至步骤 4 共 N 次, N 为预设的场景计算数量;

步骤 6:模型最终优化结果为 $E[C_x]/N$,将 N 次计算中出现 90% 以上的变量优化结果作为规划方案输出。

上层模型计算得出的网架扩展规划方案、中层模型计算得出的运行建议和下层模型考虑的局部改

造措施共同构成完整的配电网扩展规划方案,可为配电网实现向远景目标网架过渡提供有益的参考。

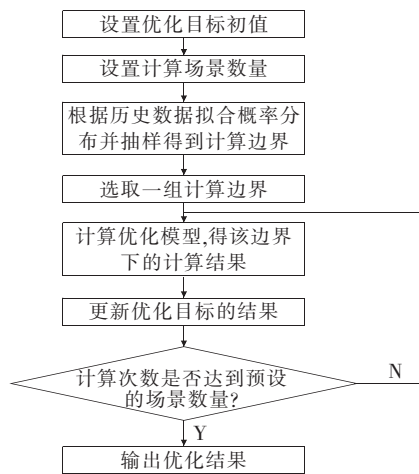


图 3 模型求解流程

Figure 3 Model solution process

3 算例分析

3.1 算例参数

该文选取某地实际配电网主网架作为算例系统,现状网架和运行方式如图 4 所示,规划主要涉及 110 kV、35 kV 2 个电压等级的配电网网架,以上级 500 kV、220 kV 变电站为电源点,计算未来 4 年(每个规划阶段为 1 年)的网架扩展规划方案。节点 9 处接入 50 MW 风电机组,节点 5 处接入 10 MW 光伏发电阵列,考虑在节点 15、16、17、18 处配置储能。

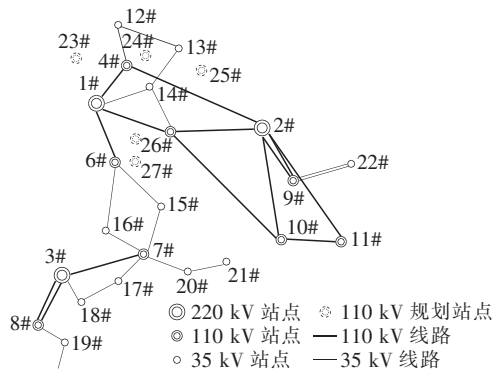


图 4 算例系统

Figure 4 Example system

算例参数选用该地调度系统中历史数据,如表 2、3 所示。全站负载率在 70% 以上的站点为重过载站点。

表 2 算例系统站点参数

Table 2 Study system site station parameters

站点名称	主变容量/ (10 ⁴ kV·A)	最大有功 负荷/MW	站点名称	主变容量/ (10 ⁴ kV·A)	最大有功 负荷/MW
1#	36.0	319.43	12#	2.0	18.09
2#	54.0	359.42	13#	3.0	25.94
3#	36.0	203.65	14#	1.5	7.14
4#	15.0	54.87	15#	1.8	15.76
5#	6.3	56.28	16#	2.5	18.19
6#	13.0	133.83	17#	1.0	7.51
7#	11.15	81.98	18#	2.0	6.36
8#	7.15	37.90	19#	1.63	14.32
9#	11.3	72.11	20#	2.0	7.99
10#	10.0	13.50	21#	1.0	5.44
11#	8.0	39.04	22#	2.0	10.24

表 3 算例系统新建站点参数

Table 3 Study system newly built station parameters

站点名称	电压等级/ kV	主变容量/ (10 ⁴ kV·A)	规划投产 阶段
23#	110	10	4
24#	110	10	1
25#	110	10	3
26#	110	10	2
27#	110	10	2

算例配网系统中的现状重过载站点标号包括: 5#、6#、7#、12#、13#、15#、16#、17#、19#。通过该文提出的配电网网架扩展规划模型, 提出规划方案并解决重过载问题。算例设置场景计算次数 N 为 500, 单位长度新建线路的成本按 800 万元/km, 配置单位容量的储能装置的成本按 1.8 元/W 计算。

3.2 上层模型计算结果

上层模型的计算过程(部分)示例如图 5 所示, 优化目标成本的单位为万元。

由计算过程可见, 当计算场景的风电、光伏出力边界水平较高时, 规划成本也相应升高。如表 4 所示, 对比优化结果可见, 风电、光伏计算边界水平高时, 规划方案中新建线路的回数减少, 但储能配置容量增大, 且多出的储能配置成本部分高于减少线路部分的新建成本, 引起计算结果升高。取出其中重复出现 450 次以上的计算结果如表 4 所示。

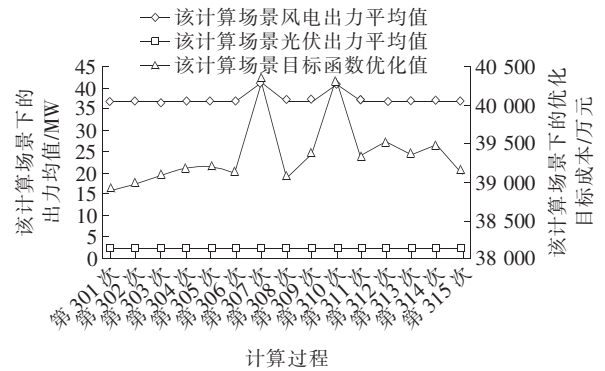


图 5 上层模型计算过程

Figure 5 Calculation process of upper-layer model

表 4 模型计算结果

Table 4 Model calculation results

计算边界	实施阶段	规划方案	总建设成本/万元
正常情况 (指 90% 以上的计算边界输出的结果)	1	新建 24#-13# 双回线路 24#-4# 双回线路	38 905.4
	1	新建 21#-10# 双回线路	
	2	新建 1#-26# 双回线路	
	2	新建 26#-27# 双回线路	
	3	新建 27#-6# 双回线路	
	3	新建 13#-25# 双回线路	
	4	新建 23#-4# 双回线路	
	4	23#-24# 双回线路	
	1	节点 15 处配置储能 9.56 MW	
	1	节点 16 处配置储能 10.12 MW	
个别情况 (指 10% 以下的计算边界输出的结果)	1	24#-13# 双回线路 24#-4# 双回线路	40 327.0
	2	5#-26# 双回线路	
	2	27#-6# 双回线路	
	3	13#-25# 双回线路	
	4	23#-4# 双回线路	
	4	23#-24# 双回线路	
	1	节点 15 处配置储能 30.34 MW	
	1	节点 16 处配置储能 24.23 MW	
	1	节点 17 处配置储能 24.23 MW	
	1	节点 19 处配置储能 20.35 MW	

根据上述 450 次计算结果的平均值, 确定节点 15、16、17、18 处分别配置 9.56、10.12、10.12、11.23 MW 的储能设备。各节点配置储能后的削峰填谷典型效果示意如图 6 所示(以 15# 站为例), 图中的负荷曲线为已叠加风光出力的净负荷曲线。

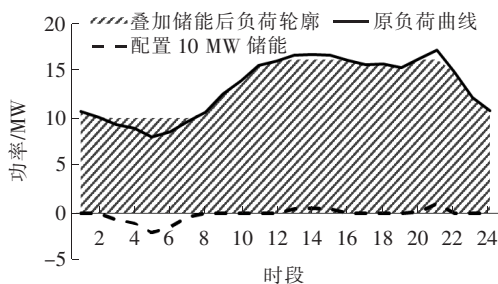


图 6 15# 站点负荷叠加储能特性

Figure 6 Station 15# load superimposed energy storage characteristics

3.3 中层模型计算结果

中层模型的部分计算过程示例如图 7 所示,风电、光伏的计算边界与上层模型相同。由图 7 可看出,基于上层扩展规划网架优化运行方式后的系统网损约为 25.6 MW,且可再生能源出力越大,系统网损越小。取出其中重复出现 450 次以上的计算结果如下:闭合 21# 站母联开关,断开 7# 站出口至 20# 站线路开关,将 20#、21# 站负荷改由 10# 站带,如此减轻 7# 站供电压力。优化后的系统运行方式如图 8、9 所示。

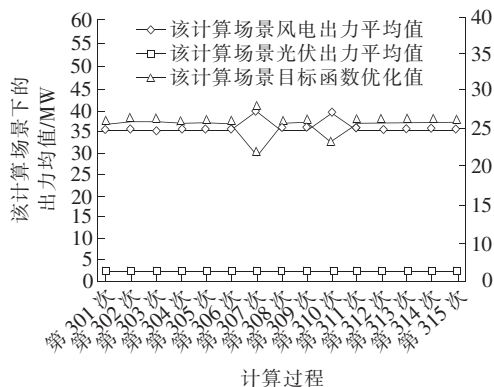


图 7 中层模型计算过程

Figure 7 Calculation process of medium-layer model

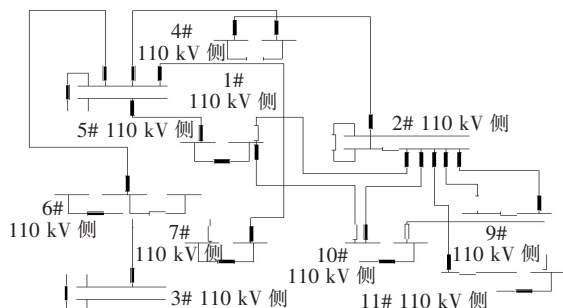


图 8 110 kV 侧运行方式

Figure 8 Schematic diagram of 110 kV side operation mode

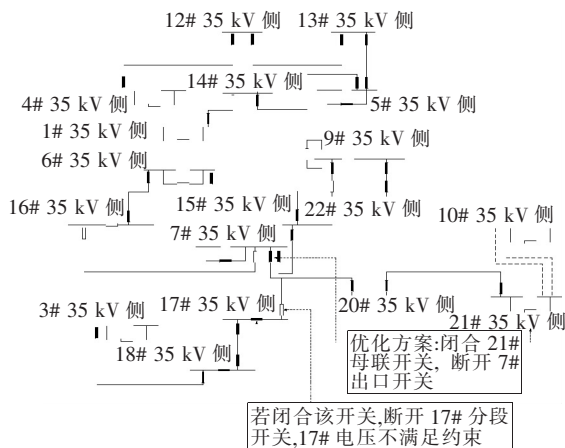


图 9 35 kV 侧运行方式

Figure 9 Schematic diagram of 35 kV side operation mode

对于断开 17# 站母线分段开关,将 17# 站一台主变的负荷及 20#、21# 站负荷均改由 10# 站供电的过程迭代方案,虽能获得更好的负载率优化收益,但因 10# 站至 17# 站线路距离过长,电压降落较大,潮流计算结果不能满足电压约束,故未采用。未采用打开 18# 站开关的方案理由相同。在该算例中,由于上层规划网架已定,除少数不合理计算结果外(7 次),规划方案的计算结果已趋稳定。经上层、中层模型计算后至规划阶段末的负荷转移情况如图 10 所示,经过计算,将现状重过载站点的部分负载向新建站点转移,使得区域总负荷在站间的分配情况更加合理。

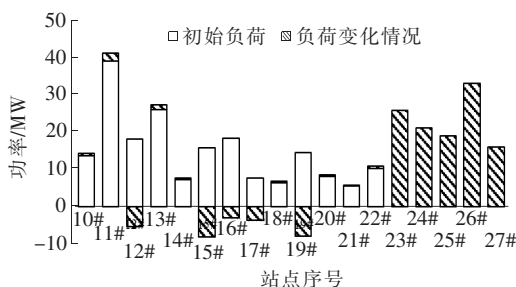


图 10 现状站点负荷转移情况示意

Figure 10 Load transfer situation of current stations

3.4 下层模型计算结果

如图 11 所示,该例中站点 7、12、16 经过上述 2 层模型优化后的负载率虽然没有超限,但处于较高水平,存在潜在越限风险类,考虑利用扩建、增容或加装移动变措施进行局部补强。该例中按 3 处站点均加装 10 MW 移动变考虑,保证其留有一定的裕度。

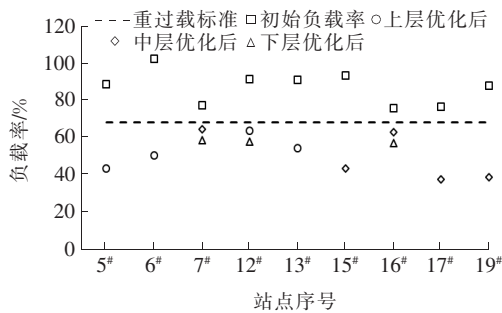


图 11 站点规划成效

Figure 11 Station planning effect

3.5 规划成效与有效性分析

综合上述分析,通过该文提出的3层规划模型可确定配电网扩展规划方案,经过规划现状重过载站点的负载率改善情况如图11所示,现状重过载站点的理论负载率均降至重载线标准以下,站点的负载率得到了相应改善。

为进一步说明该文所提出的基于随机期望值模型的配电网扩展3层规划模型的有效性,将该文计算所得的规划方案与计算过程中因个例计算边界预测水平偏高产生的规划方案进行对比,如表4所示。

由表4可见,规划模型的计算结果十分依赖输入边界。由于风电、光伏的出力具有不确定性特征,数量较少的输入边界计算出的结果不具有一般性。该文利用随机期望值模型,经过重复试验,确定90%以上计算场景边界下的规划方案作为输出结果,剩余10%计算场景可作为对输出结果的补充。

该文的主要工作是提出了由上层网架规划、至中层方式调整再到下层局部改造的规划流程,将规划与运行手段相结合,利用随机期望值模型,通过大量计算处理计算边界的不确定性,提升规划精度,以期为工程实际提供一些有益的参考。

4 结语

该文提出考虑不确定性因素接入影响、匹配负荷增长与远景目标网架的过渡方案规划流程,构建包括上层网架规划、中层运行优化和下层局部补强的3层规划模型。

1)上层网架规划模型计算规划站点接入系统方案,中层运行优化模型计算供电方案,下层模型考虑局部补强措施。该文建立的随机期望值规划模型体

现了源—网—荷协调、整体与局部结合、规划与运行结合的原则。

2)结合一个实际配电网网架算例,经过优化计算,系统内站点的负载率均在重过载水平以下。通过与特殊计算边界下模型计算结果的对比,可见采用随机期望值模型能够增强规划结果的一般性,为实际工程提供有益的参考。

3)所提出的3层规划模型依赖一定数量的计算场景,如何优化模型的求解步骤和算法,进一步提高各层模型的计算速度、增强实用性,将是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 邵华,贺春光,安佳坤,等.基于线性约束的有源配电网规划研究[J].电力科学与技术学报,2020,35(5):66-74.
SHAO Hua, HE Chunguang, AN Jiakun, et al. Active distribution network planning model based on linearized constraints[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 66-74.
- [2] 李婷,胥威汀,刘向龙,等.含高比例可再生能源的交直流混联电网规划技术研究综述[J].电力系统保护与控制,2019,47(12):177-187.
LI Ting, XU Weiting, LIU Xianglong, et al. Review on planning technology of AC/DC hybrid system with high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 177-187.
- [3] 孔祥玉,尧静涛,崔凯,等.考虑分布式电源接入的区域配电网规划投资决策方法[J].中国电力,2020,53(4):41-48.
KONG Xiangyu, YAO Jingtao, CUI Kai, et al. Investment decision-making method for regional distribution network planning considering distributed generations [J]. Electric Power, 2020, 53(4): 41-48.
- [4] 宋云超,王丹,何伟,等.基于场景构建技术的含多种清洁能源微能源网多目标随机规划研究[J].电力系统保护与控制,2019,49(3):20-31.
SONG Yunchao, WANG Dan, HE Wei, et al. Research on multi-objective stochastic planning of micro-energy grid with multiple clean energy based on scenario construction technology[J]. Power System Protection and Control, 2019, 49(3): 20-31.
- [5] 刘英,肖阳,刘松华,等.隧道内电缆集群敷设对载流量的影响研究[J].高压电器,2019,55(8):123-130.

- LIU Ying, XIAO Yang, LIU Songhua, et al. Research on the influence of cable cluster laying in tunnel on current carrying capacity[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8):123-130.
- [6] 宋森,王克文. 主动配电网中考虑空间与时间相关性的分布式光伏并网规划[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5):106-114.
- SONG Miao, WANG Kewen. Planning of distributed PV grid-access considering the space and time correlation in active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5):106-114.
- [7] 沈依婷,张菁,武鹏,等. 含电动汽车的配电网双重不确定性网架规划方法[J]. 中国电力, 2020, 53(4):139-146.
- SHEN Yiting, ZHANG Jing, WU Peng, et al. Bi-uncertainty network frame planning method for distribution network with electric vehicles[J]. Electric Power, 2020, 53(4):139-146.
- [8] Munoz-Delgado G, Contreras J, Arroyo J M. Multistage generation and network expansion planning in distribution systems considering uncertainty and reliability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5):3715-3728.
- [9] 王明捐,刘友波,高红均,等. 计及运行成本风险的主动配电网两阶段随机模型预测控制[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(11):8-18.
- WANG Mingjuan, LIU Youbo, GAO Hongjun, et al. A two-stage stochastic model predictive control strategy for active distribution network considering operation cost risk[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(11):8-18.
- [10] 金烨璇,张桐郡,王坤,等. 基于原对偶优化模型的配电网规划方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(3):109-116.
- JIN Yexuan, ZHANG Tongjun, WANG Kun, et al. Distribution network planning method based on prime-dual optimization model[J]. Smart Power, 2020, 48(3):109-116.
- [11] Amjady N, Attarha A, Dehghan S, et al. Adaptive robust expansion planning for a distribution network with DERs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2):2698-1715.
- [12] 杨昆,周晓健,夏能弘,等. 考虑微电网接入下的配电网优化规划[J]. 电测与仪表, 2019, 56(2):52-58+69.
- YANG Kun, ZHOU Xiaojian, XIA Nenghong, et al. Optimal planning of distribution network with micro-grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(2):52-58+69.
- [13] 张海波,张晓云,陶文伟. 基于广度优先搜索的配电网故障恢复算法[J]. 电网技术, 2010, 34(7):103-108.
- ZHANG Haibo, ZHANG Xiaoyun, TAO Wenwei. A breadth-first search based service restoration algorithm for distribution network[J]. Power System Technology, 2010, 34(7):103-108.
- [14] 李锐,彭明洋,顾衍璋. 数字化转型下的南方电网供电可靠性发展策略[J]. 供用电, 2021, 38(3):38-44.
- LI Rui, PENG Mingyang, GU Yanzhang. Development strategies of CSG power supply reliability management under digital transformation[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(3):38-44.
- [15] 禹海峰,潘力强,吴亚茹. 储能提升含高比例风电电力系统可靠性分析[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(6):92-98.
- YU Haifeng, PAN Liqiang, WU Yaru. Analysis of energy storage improving the reliability of power system with high proportional wind power[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(6):92-98.