考虑传输能力的含分布式电源配电网扩展规划方法

赵海洲¹,陈建凯²,杨海跃¹,李铁良¹,王洪坤^{2,3},王守相² (1. 国网河北省电力有限公司衡水供电分公司,河北 衡水 053000; 2. 天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072; 3. 石河子大学 机械电气工程学院,新疆 石河子 832000)

摘要:为灵活性资源提供快速、及时调度的网架传输通道,在规划阶段充分考虑网架结构与分布式电源(DG) 规划对配电网传输能力的影响,提出考虑网架通道传输能力的配电网扩展规划及DG选址定容双层优化方 法。首先建立了线路负荷裕度指标和潮流均衡度指标用以评价配电网传输能力;其次分析了网架通道传输 能力的影响因素,在此基础上构建了配电网扩展规划及DG选址定容双层优化模型,保证了规划方案具有良 好的经济性和网架通道传输能力,利用嵌套的混合粒子群优化算法进行优化求解;最后将所提规划方法与只 考虑经济性规划方法进行了算例验证。仿真结果表明,所提方法不仅没有增加经济费用,而且所得规划方案 网架潮流更均衡,线路负荷裕度更高,传输能力更优。

关键词:网架扩展规划;DG选址定容;网架传输通道;双层规划模型;灵活性资源;粒子群优化算法
 中图分类号:TM 734
 文献标志码:A
 DOI:10.16081/j.epae.202107007

0 引言

分布式电源(DG)渗透率逐年提高,其出力波动 性及不确定性为配电网带来灵活性需求问题,配电 网灵活性不足将导致弃风弃光现象发生,降低DG 利用率,增加运行维护费用^[1]。合理调度灵活性资 源以及快速、及时响应灵活性需求是目前提升灵活 性的有效措施,而网架传输通道阻塞不仅影响DG 异地消纳[2],同样会限制灵活性资源的及时响应,间 接影响配电网的灵活性。其次,DG的接入会造成配 电网网架局部线路潮流方向、大小频繁变化,甚至导 致传输通道阻塞现象发生^[3],其影响优劣程度与DG 安装位置及容量大小密切相关。可以预见,如果在 扩展规划水平年内能为灵活性资源的调度及DG异 地消纳提供良好的传输通道,不仅能够在该规划水 平年内保证灵活性资源的及时、快速响应,降低运行 维护成本,而且在下一规划水平年也将大幅节省扩 展规划建设成本。因此扩展规划在考虑经济性的同 时,还应兼具网架线路、DG位置及容量的合理布局 与选取,提高网架通道传输能力,为灵活性资源的传 输提供支撑和保障。

近年来,众多学者对于大电网灵活性的研究较 多,而对于配电网灵活性的研究较少。文献[4]从配 电网的高级形态出发,阐述了灵活性视角下的配电 网规划问题,并指出配电网灵活性量化基础由节点 型灵活性和网络型灵活性组成。文献[5]考虑灵活

收稿日期:2020-09-24;修回日期:2021-05-08

基金项目:国网河北省电力有限公司科技项目(kj2020-015) Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Hebei Electric Power Co.,Ltd.(kj2020-015) 性资源的物理特性及灵活性的多维属性,将智能软 开关作为网络型灵活性资源接入配电网,配合节点 型灵活性资源,建立了计及经济性和灵活性的优化 调度模型,有效改善了潮流分布,提升了网架通道的 传输能力及系统运行灵活适应性,但其优化仅基于 运行层面,并未考虑网架扩展对传输能力的影响。 在网架规划方面,文献[6]建立了双层优化规划模 型,从不同主体利益出发,在满足负荷需求的同时, 分别优化配电网运营商投资费用和用户消费成本。 文献[7]建立了考虑网架结构动态重构影响的主动 配电网双层扩展规划模型,通过网架重构,提升了 DG消纳能力,降低了网架线路建设成本。文献[8] 提出了一种基于集群划分的配电网网源协调扩展规 划模型,优化了网络结构,保证了群内节点互补能 力,提高了DG消纳能力。文献[9]分析了储能容量 及布局对于电网规划的影响,提出考虑灵活性供需 平衡的源-储-网一体化规划方法,该方法有效降低 了系统弃风电量,提升了系统灵活性。但以上文献 在规划扩展过程中,均未考虑网架通道传输能力。 文献[10]从传输通道负载率水平和传输功率波动剧 烈程度2个方面建立了时序传输通道潮流评估模 型,有效评估了传输通道发生阻塞的难易程度,并从 网络解和非网络解2个方面给出了提升措施,但其 优化目的仍是提升 DG 消纳水平,并未结合网架扩 展进行研究。文献[11]针对高比例DG接入下系统 灵活性不足问题,提出了兼顾电力平衡和灵活性平 衡的储能与输电线路扩展联合优化规划方法,利用 输电线路扩展满足主体容量的输送需求,利用储能 的削峰填谷能力实现传输通道的"无线路扩容",进 而提升系统灵活性。文献[12]提出成立基于需求响

应的灵活性交易中心,并引入DG参与交易,从而降低配电网阻塞,提升配电网灵活性。文献[13]从网架柔性角度出发,将经济性、可靠性、安全性柔性化处理,提出了柔性规划模型的计算方法,相比于确定性建模,所得规划结果能有效提升网架通道的传输能力,且在经济性、可靠性、安全性3个方面综合最优,但该文献并未提及DG的选址定容对网架通道传输能力的影响。

综合上述研究,本文旨在对灵活性有支撑作用 的网架传输能力进行进一步分析。在扩展规划时, 为了避免网架线路布局和DG位置容量对传输能力 的不利影响,从网架结构本身出发,将网架扩展规划 及DG选址定容作为灵活性提升手段,提出一种考 虑传输能力的含DG配电网双层扩展规划方法。该 方法的上层模型决策变量是网架线路布局及DG安 装位置,优化目标是年综合费用最小和线路负荷裕 度最大;下层模型决策变量是DG容量,优化目标是 网损费用最小和线路负荷裕度标准差最小。针对各 层的双目标优化问题,均进行归一化并赋权处理使 其简化为单目标优化问题。利用嵌套的混合粒子群 优化算法进行优化求解,在提升网架通道传输能力 同时,保证年综合费用最优。最后将本文所提方法 与只考虑经济性规划方法进行对比验证,仿真结果 表明所提方法在经济总费用和传输能力等方面具有 明显优势。

1 网架通道传输能力影响机理

网架传输通道虽然不能直接解决电力需求,但 是可以为灵活性资源的传输提供通道,是配电网灵 活性资源发挥响应能力的重要支撑平台^[5]。因此, 保障网架传输通道畅通是提高系统灵活性的前提。 在电力系统运行中, 网架通道出现过载的现象被称 为阻塞, 主要表现为线路过载、变压器过载^[14]2种情 况。负荷需求及DG出力差额在长时间尺度上引起 的功率波动是传输通道阻塞的主要原因, 两者差额 较大则功率波动较大, 当超过线路通道最大允许值 时将会发生线路阻塞。为了便于研究, 从线路传输 通道角度出发, 选择可以体现线路传输特性的模型, 用线路负荷裕度来表征传输通道的负载情况。设线 路ij的最大允许传输功率为 $I_{i,max}$, 线路ij在t时刻实 际潮流功率为 $I_{i,t}$,则线路传输通道的实时负荷裕 度 $F_{i,t}$ 为:

$$F_{ij,t} = \frac{I_{ij,\max} - I_{ij,t}}{I_{ij,\max}} \times 100 \%$$
(1)

线路传输通道的实时负荷裕度越大, 网架通道 发生阻塞的可能性越低, 因此可以用线路负荷裕度 的高低来评价网架通道的传输能力。若线路*ij*在整 个周期内裕度均大于0, 则表示该条线路未发生过 载。另外,线路ij的传输功率差额与允许值的比值 在一定程度上反映了网架潮流均衡度^[5],进一步地, 从整体网架及时间周期2个角度,提出网架通道线 路负荷裕度标准差及时间周期线路负荷裕度标准 差,模型如式(2)所示。

$$\begin{cases} F_{i,\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{ij \in N_{ij}} \left(F_{ij,i} - \frac{1}{N} \sum_{i'j' \in N_{ij}} F_{i'j',i} \right)^2} \\ F_{ij,\sigma} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \left(F_{ij,i} - \frac{1}{T} \sum_{i'=1}^T F_{ij,i'} \right)^2} \end{cases}$$
(2)

式中:T为整个运行周期;N为已有线路和待建线路 总数; N_{ij} 为已有线路和待建线路的集合, $ij \in N_{ij}$ 表示 线路ij为已有线路或待建线路; $F_{t,\sigma}$ 为t时刻整体网 架通道线路负荷裕度标准差,其值越小,整体网架的 潮流越均衡; $F_{i,\sigma}$ 为线路ij在整个时间周期线路负荷 裕度标准差,其值越大则潮流波动越大,说明该线路 在长时间尺度下潮流不均衡,易出现短时阻塞问题。 $F_{t,\sigma}$ 体现了某一时刻网架全部线路的潮流均衡度, $F_{ij,\sigma}$ 体现了某条线路在整个运行周期内的潮流均 衡度。

由上述分析可知,式(1)保证了传输能力基准 值,式(2)限制了潮流波动,式(1)、(2)从2个维度定 义了网架通道传输能力。两者结合既避免了潮流波 动较大出现短时阻塞问题,也避免了标准差相同概 率分布不同的问题。

1.1 网架结构布局对网架通道传输能力影响分析

为了更加直观地表述网架在扩展规划过程中, 线路布局对于网架通道传输能力的影响,利用文献 [15]中改进的IEEE 33节点系统扩展规划数据,设 置如附录A图A1所示6种布局方案,分析线路布局 对网架传输通道的影响,分析结果如附录A图A2 所示。

由图A2可知,线路布局的改变及拟增负荷节点 有功负荷的增加,线路负荷裕度呈现2点显著变化。 ①待建线路接入后,对相应接入节点所在分支的上 游线路影响较大,增加了上游线路负载量,且无论怎 样改变线路布局,都无法明显提升上游通道的线路 负荷裕度。这是因为上游通道始终担负着为下游新 增负荷节点传输电能的责任,此时可以将拟增负荷 节点直接接入电源节点,形成一条新的馈线(如方案 5)。但考虑到地理位置及建设成本等因素,也可以 选择将拟增负荷节点分散接入,减少部分线路传输 压力(如方案4)。②拟增负荷节点的负荷量达到一 定程度时,上游通道发生线路阻塞(如方案6)。这 是因为随着负荷需求的增加,线路中实际潮流功率 超出了线路最大允许值。线路传输能力受限,将无 法满足该条分支上的负荷需求,系统供电可靠性降 低,同时也阻塞了灵活性资源的及时调度,降低了系统的灵活性。

1.2 DG并网对网架通道传输能力影响分析

1.1节分析结果说明拟增负荷若不直接接入电源节点,必将导致上游通道线路负载量增加,甚至发生通道阻塞。可对上游线路进行升级扩容,但升级扩容并非唯一办法,可配合DG安装位置布局以及DG容量选取来满足其辐射范围内的负荷需求,降低上游通道线路负载量,进而延缓线路的扩容改造,降低供电成本。为了更好地说明DG安装位置及容量选取的重要性,在方案6的基础上设置4种DG安装位置布局方案如附录A表A1所示。各传输通道的线路负荷裕度如附录A图A3所示。

对比图 A3 所示 4 种方案可知, DG 安装位置及 容量不同时, 各传输通道的线路负荷裕度均有所不 同, 具体可总结为如下 3 点:①不考虑 DG 安装位置 和容量, DG 接入均可不同程度地提升个别通道的线 路负荷裕度, 避免因负荷需求的增加而导致通道阻 塞情况发生;②各通道线路负荷裕度提升情况因 DG 安装位置的不同有所差别, 由图 A3 可知方案 4 要优 于方案 3, 且方案 2 优于方案 1, 甚至个别通道如线路 6 的线路负荷裕度相差近 10%;③对比方案 1—4可 知, 所接入的 DG 容量过大, 个别通道如线路 14—16 的负荷裕度发生先增大后减小的情况, 这是因为 DG 容量过大将导致 DG 异地消纳, 连接 DG 的上游通道 潮流方向发生改变, 潮流功率的逆向增加会减小线 路负荷裕度。

1.3 传输能力影响机理

根据1.1节和1.2节分析可知,在含DG接入的 配电网扩展规划中,待建线路布局、DG安装位置及 DG安装容量均会不同程度地影响网架通道传输 能力。

合理的线路布局能够分散已有通道的线路负载 量,避免因传输容量过度集中于某一条线路而导致 传输通道阻塞。DG安装于某一负荷节点后,在一定 程度上降低与其相连通道的线路负载量^[16],若DG 安装位置合理,将使整个网架通道传输能力处于较 优的水平。

因此,在扩展规划时,应充分考虑网架结构及 DG选址定容的协调配合,保障网架通道传输能力, 避免因线路阻塞带来DG异地消纳及节点型灵活性 资源调度受限情况的发生。

2 配电网扩展规划与DG选址定容双层优化 模型

节点型灵活性资源的快速响应能力需以网架通 道具备良好的传输能力为前提,理论上通道的线路 负荷裕度越高,其传输能力越强。但规划过程中一 味追求负荷裕度的提升必将造成经济投资的增加, 当规划年内用于提升网架通道传输能力的投资金额 大于相应收益金额时,将造成经济资源的浪费。因此,在保证网架通道传输能力的同时,保证合理的经 济投资也同等重要。

2.1 上层优化模型

综合考虑网架规划的经济性与通道传输能力, 上层优化模型以年综合费用最小和线路负荷裕度 最大为优化目标,合理地规划网架线路布局及DG 安装位置。

2.1.1 上层目标函数

上层目标函数同时考虑年综合费用和线路负荷 裕度,根据专家经验,赋予权重系数及归一化系数, 将双目标简化为单目标问题进行求解,其表达式如 式(3)所示。

$$\begin{cases} \min F = \lambda_{1} F_{CE} - \lambda_{2} \zeta_{1} \frac{1}{T} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{T} \sum_{ij \in N_{ij}} F_{ij,t} \\ F_{CE} = F_{GC} + F_{GP} + F_{PV} + F_{NL} - F_{GS} \end{cases}$$
(3)

式中: λ_1 和 λ_2 为权重系数; ζ_1 为归一化系数; F_{cc} 为网 架线路投资费用等年值; F_{CP} 为年购电费用; F_{PV} 为光 伏投资成本等年值; F_{NL} 为年网损费用; F_{CS} 为光伏发 电政府补贴。各项经济费用计算公式如式(4)—(8) 所示。

$$F_{\rm GC} = \frac{r(1+r)^{y}}{(1+r)^{y} - 1} \sum_{k=1}^{N} x_k c_k \tag{4}$$

$$F_{\rm GP} = \sum_{t=1}^{T} c_{\rm GP} \left(p_{\rm load, t} + p_{\rm loss, t} - p_{\rm DG, t} \right)$$
(5)

$$F_{\rm PV} = \frac{r(1+r)^{y} - \alpha r}{(1+r)^{y} - 1} E_{\rm PV} c_{\rm PV,\,ins} + E_{\rm PV} c_{\rm PV,\,mai}$$
(6)

$$F_{\rm NL} = \sum_{t=1}^{T} p_{\rm loss, t} c_{\rm loss} \tag{7}$$

$$F_{\rm GS} = \sum_{t=1}^{T} p_{{\rm DG},t} c_{\rm GS}$$
 (8)

式中:r为贴现率;y为使用年限; α 为设备使用残值; x_k 为状态变量,其取值为0表示第k条线路不建设, 其取值为1表示第k条线路建设; c_k 为第k条线路建 设费用; c_{cP} 为单位年购电成本; $c_{PV,ins}$ 为单位容量的 光伏安装成本; $c_{PV,mai}$ 为单位容量光伏维护成本; c_{loss} 为单位网损成本; c_{cS} 为光伏发电的政府补贴单位收 益; $p_{load,t}$ 为t时刻负荷总功率; $p_{loss,t}$ 为t时刻网损总功 率; $p_{DG,t}$ 为t时刻光伏发电总功率; E_{PV} 为光伏安装 容量。

2.1.2 约束条件

结合配电网扩展规划线路布局及实际运行情况,上层模型约束条件包括连通性约束、辐射性约 束、线路负荷裕度约束、节点电压约束、潮流约束以 及线路约束。

1)连通性约束。

任意负荷节点或与该负荷节点相连的邻近节点 都应由线路与大电网相连^[17]。在某一规划生成的网 架结构中,只要保证任意负荷节点至少有1条进线 与其相连,该节点就必然与上级电网相连,其数学模 型为:

$$\sum_{i \neq i_j \cap \psi_j} y_j \ge 1 \quad j \in \psi_{\text{node}} \tag{9}$$

式中: ψ_{ij} 为已生成网架结构的所有线路集合; ψ_{j} 为负 荷节点*j*的进线集合; $j \in \psi_{ij} \cap \psi_{j}$ 表示负荷节点*j*直接 或间接与已生成网架相连; ψ_{node} 为所有负荷节点集 合; y_{j} 为负荷节点*j*进线状态,其取值为1表示负荷 节点直接或间接与已生成网架相连,其取值为0表 示负荷节点与已生成网架不连通。

2)辐射性约束。

配电线路在扩展规划过程中应避免环状结构的 出现,需满足"闭环设计,开环运行"的原则,在保证 连通性约束的前提下,最简单的约束则是最终规划 的线路数比节点数少1。其数学模型为:

$$N = N_{\rm node} - 1 \tag{10}$$

式中:N_{node}为已有负荷节点与待建负荷节点总和。 3)线路负荷裕度约束。

每个生成的网架规划方案应满足线路负荷裕度 约束,其数学模型为:

$$F_{ij,t} > 0 \tag{11}$$

4)节点电压约束。

为维护配电系统运行安全,节点电压应控制在 一定范围内,其数学模型为:

$$U_{j\min} \leqslant U_j \leqslant U_{j\max} \tag{12}$$

式中:U_{jmax}和U_{jmin}分别为节点电压幅值U_j的上限值和下限值。

5) 潮流约束。

节点i处潮流方程为:

$$\begin{cases} P_{i} = U_{i} \sum_{j \in i} U_{j} \left(G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij} \right) \\ Q_{i} = U_{i} \sum_{j \in i} U_{j} \left(G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij} \right) \end{cases}$$
(13)

式中: $P_i 和 Q_i 分别为节点 i 处注入的有功和无功; j \in i 表示节点 i 与节点 j 相连; <math>G_{ij} \pi B_{ij}$ 分别为线路 i) 的电导和电纳; θ_{ij} 为相角差。

6)线路约束。

不考虑经济性,对线路进行改造、扩容均是提升 线路负荷裕度的直接有效方法,但本文的研究重点 为将扩展规划本身作为一种提升传输能力的手段。 为了排除其他因素的干扰,设待建线路的导线规格 统一。

2.2 下层优化模型

基于上层的网架线路布局和DG安装位置,综 合考虑运行网损费用及潮流均衡度,以网损费用最 小及线路负荷裕度标准差最小为优化目标,结合负荷需求及DG的出力情况,合理地选取DG的安装容量。

2.2.1 下层目标函数

目标函数同时考虑网损费用和线路负荷裕度标 准差,在减小网损费用的同时,尽可能保证传输通道 在整体网架结构及长时间周期上的潮流均衡,使线 路负荷裕度稳定在一定水平,其数学模型为:

$$\min F' = \lambda_3 F_{\text{NL}} + \lambda_4 \zeta_2 \left(\sum_{i=1}^T F_{i,\sigma} + \sum_{ij \in N_{ij}} F_{ij,\sigma} \right) \quad (14)$$

式中: λ_3 和 λ_4 为权重系数; ζ_2 为归一化系数。 2.2.2 约束条件

下层模型包括潮流约束、节点电压约束等常规 约束外,还应包括DG运行出力约束、安装容量约束 及功率平衡约束,分别见式(15)—(17)。

$$P_{\text{DG},n,\min} \leq P_{\text{DG},n} \leq P_{\text{DG},n,\max}$$

$$Q_{\text{DG},n,\min} \leq Q_{\text{DG},n} \leq Q_{\text{DG},n,\max}$$
(15)

$$E_{\mathrm{DG},n,\min} \leq E_{\mathrm{DG},n} \leq E_{\mathrm{DG},n,\max}$$
(16)

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{node}}} p_{\text{load},t}^{i} + \sum_{i=1}^{N} p_{\text{loss},t}^{i} = \sum_{n=1}^{N_{\text{DG}}} p_{\text{DG},t}^{n} + p_{\text{GP},t}$$
(17)

式中: $P_{DG,n,max}$ 和 $P_{DG,n,min}$ 分别为第n个 DG 实际有功出 力 $P_{DG,n}$ 的上限和下限; $Q_{DG,n,max}$ 和 $Q_{DG,n,min}$ 分别为第n个 DG 实际无功出力 $Q_{DG,n}$ 的上限和下限; $E_{DG,n,max}$ 和 $E_{DG,n,min}$ 分别为第n个 DG 实际安装容量 $E_{DG,n}$ 的上限 和下限; $p_{GP,t}$ 为t时刻购电量; N_{DG} 为 DG 安装数量。

3 模型求解

本文针对配电网扩展规划双层优化模型,采用 嵌套的混合粒子群优化算法进行优化求解。双层优 化模型在各自寻优过程中具有交互关联性,下层DG 容量的优化基于上层网架线路布局及DG安装位置 的决策结果,而同时下层模拟求得的网损费用、DG 出力等结果又将返回上层,作为上层优化目标的一 部分,通过双层迭代寻优,完善最终规划结果。附录 A图A4为双层嵌套粒子群优化算法流程图,具体算 法求解步骤如下。

步骤1:输入配电网结构参数以及各典型日负 荷需求、DG出力标幺值曲线等参数。

步骤2:进行上层粒子编码。初始化上层粒子 种群和迭代次数,对待建线路及DG安装位置进行 二进制编码,随机产生上层粒子位置及速度,初始化 粒子群。

步骤 3:得到网架线路布局及 DG 安装位置,剔除并更新不合理的网架结构,作为基础参数输入下 层模型。

步骤4:进行下层粒子编码。初始化下层粒子

种群和迭代次数,对每个DG的容量进行整数编码,随机产生下层初始粒子群。

步骤5:根据上层各个线路布局及DG安装位置 方案,逐一进行DG容量配置,并进入主循环。

步骤6:进行潮流计算,计算网损量、DG出力等数据,计算整体网架和时间周期线路负荷裕度标准差,执行式(14)所示下层目标函数,更新下层各网架结构方案对应的DG容量个体极值和全体极值,将全体极值作为各方案对应的DG容量最优解;更新优化DG容量,即粒子的速度和位置。

步骤7:判断是否满足下层收敛条件,若满足则 转向步骤8,否则转向步骤5。

步骤8:根据下层最优容量配置,进行上层潮流 优化计算,计算线路负荷裕度、购电量以及投资成本 等年值,结合下层网损量以及DG出力数据,执行 式(3)所示上层目标函数,可以得到上层个体极值, 将上层个体极值作为全局极值,并更新上层粒子的 速度和位置。

步骤9:判断是否满足上层收敛条件,若满足则 转向步骤10,否则转向步骤3。

步骤10:输出上层全局极值作为最优规划 方案。

4 算例分析

4.1 基础数据

对扩展规划文献[15]中修改的IEEE 33节点系 统算例做进一步修改,验证本文所提方法有效性。 值得注意的是,为了保证供电可靠性,保留IEEE 33 节点系统标准算例中5条联络线支路,因本文扩展 规划并未涉及该支路,因此在网络结构图中不再 体现。扩展规划网络结构图见附录A图A5,虚线为 可建设线路;线路1—32按照IEEE 33节点系统算 例进行命名,对应新增负荷节点及可建设支路信 息见附录A表A2。DG类型为光伏,且除电源节点 外,其余节点均可安装。各典型日光伏出力、负荷需 求变化规律参考文献[7];分时电价、网损成本、发 电补贴、光伏安装成本及维护成本参考文献[18];线 路1—5的电流最大允许传输值为500 A,其余线路 均为300 A;贴现率为3%;残值率为5%;工程周期 为10 a。

为了验证本文双层规划模型在改善网架传输能 力方面的效果,分别考虑2种不同方案下的规划结 果。方案1为规划时不考虑网架通道传输能力,只 考虑规划经济费用;方案2为规划时同时考虑网架 传输能力及规划经济费用。

4.2 扩建规划结果分析

不同规划方案规划结果见附录A图A6,各项

经济费用见附录A表A3,不同方案下DG安装容量 见附录A表A4,不同方案下线路序号说明见附录A 表A5。选取净负荷最大时刻(夏季典型日20:00)及 净负荷最小时刻(春季典型日12:00),对2种规划方 案各条通道的线路负荷裕度进行对比,对比结果 见图1。



图1 不同方案线路负荷裕度

Fig.1 Line load margin of different schemes

由附录A表A3可以看出,方案1在扩建线路费 用、DG安装投资费用及维护费用等方面花费较少, 这表明当模型不考虑线路负荷裕度时,线路布局更 偏向距离近花费少的线路,以减少投资费用。而随 着DG洗址定容时决策因素的减少,DG的安装位置 及容量未考虑减少整体网架的网损费用、安装成本 及维护成本等因素,线路布局及DG安装位置的不 合理影响了个别通道传输能力,进而导致部分通道 线路负荷裕度较低。且通过附录A表A4可知,DG 安装容量受经济投资及规划出的网架通道传输能力 的限制,大幅减少了光伏安装容量。方案2在购电 费用、光伏补贴费用及网损费用方面优于方案1,这 表明当考虑线路负荷裕度后,网架线路在布局时不 再局限于经济因素,使扩展的网架在传输能力方面 更加合理,各通道潮流分布较为均衡;DG在安装位 置及容量的选择方面配合网架的线路布局,更进一 步优化了各通道的传输能力,均衡了潮流分布。网 架线路布局与DG选址定容的配合增加了DG的安 装容量,虽然增大了DG的投资成本及维护成本,但 DG出力也随之增大,良好的网架布局及DG安装位 置为DG有功出力的传输提供了足够的裕度,减小 了配电网购电费用。

由图1可以看出,2种极端条件下方案2的线路 负荷裕度均优于方案1,且方案2夏季和春季的整体 网架线路负荷裕度标准差分别为0.0685和0.0312, 分别优于方案1的0.0992和0.0376,整体网架潮流 均衡度也得到了一定改善。根据文献[19]中对于线 路运行严重度定性描述的等级划分,可以判断方案 1在夏季典型日20:00时线路1、2处于高负载运行等 级,若不及时提升通道传输能力,未来运行中可能会 造成该通道阻塞,上级电网电能无法传输给配电网 用户,进而将会引起下游通道相关负荷节点需求难 以得到满足。此时根据文献[8]中网络解的描述可 知,通过改善网架结构来改善潮流分布或根据非网 络解的描述指导DG出力,可改善潮流分布。方案2 经过合理规划,得到的网架提升了线路1、2的线路 负荷裕度,使其负载等级处于中等负载运行范围,也 即正常运行范围。另外,其他个别重要通道传输能 力也得到了一定提升,均处于安全运行的范围,提高 了线路应对极端恶劣条件的负载能力,减少了潜在 经济损失。

选取2种方案中网架通道容易发生阻塞的线路 1-5作为研究对象,分析对比其在时间周期上的潮 流均衡度,对比结果如附录A表A6所示。由表可以 看出,方案1中线路1-5在1a的时间周期中线路 负荷裕度标准差均大于方案2。结合图1中线路 1-5在2种极端时刻下的线路负荷裕度可知,方案 2不仅在整个时间周期内线路负荷裕度更优,而且 其裕度波动程度更小。这是因为当扩展规划只考虑 经济性时,一方面,负荷在1a中不同时刻变化程度 不一致导致线路负载率呈现忽高忽低的现象,从而 使线路负荷裕度波动较大;另一方面,只考虑经济性 规划时可能会加剧部分线路负载率,从而使某些线 路在整个时间周期内线路负荷裕度都处于较低水 平。而方案2考虑传输能力之后,规划结果更加合 理,不仅避免了其自身带来的阻塞问题,从整个时间 周期上提高了线路负荷裕度,而且在很大程度上减 小了负荷带来的高负载率,降低了线路负荷裕度的 波动程度。

4.3 扩建规模及DG容量与线路负荷裕度关系特性

选取规划方案2中网架上游的主要线路1-5 作为研究对象,分析网架扩建规模与线路负荷裕 度的关系特性。扩建规模以扩建规模占比的形式给 出,扩建规模占比指扩建总负荷占原有总负荷的 比例。扩建规模占比与线路负荷裕度的关系特性如 图2所示。





由图2可以看出,随着扩建规模的增大,线路1— 5的线路负荷裕度均逐步减小。当扩建规模占比大 于0.7505时,线路1将发生阻塞。此时对应的扩建 规模为极限扩建规模,是理论上的可行解。当扩建 规模大于此比例时,受线路传输容量的限制,负荷需 求将难以满足,必将产生供电可靠性及灵活调度能 力下降问题。因此扩建负荷规模不仅要与上级变电 站相匹配,还应与主要线路的传输能力相匹配,以免 受到传输线路的限制降低供电可靠性及灵活调度 能力。

取规划方案2安装在节点26的DG上游线路25、26作为研究对象,分析DG渗透率与线路负荷裕度关系特性,如图3所示。



Fig.3 Relationship characteristic results

由图3可以看出,随着DG渗透率的增大,线路 25、26的线路负荷裕度均先后达到饱和状态后再减 小,这表明DG发生异地消纳时影响的线路呈辐射 状扩散,直至功率发生倒送。另外,当DG渗透率为 60%时,线路负荷裕度约为50%,线路25、26均处于 中度负载等级,基本不会发生线路阻塞;当DG渗透 率增加到80%时,线路25、26均将处于较高负载等 级,虽然还具备一定的线路负荷裕度,但是负载率较 高,不能完全保证线路不会发生阻塞^[8],这表明DG 渗透率增大与否还应充分考虑当地负荷需求及线路 传输能力等因素,避免造成经济资源及灵活性资源 的浪费。

5 结论

本文针对灵活性资源传输通道堵塞问题,在扩展规划阶段充分考虑网架结构及DG选址定容对网架通道传输能力的影响,建立了考虑网架通道传输 能力的配电网扩展规划与DG选址定容优化模型, 并利用嵌套的二进制粒子群优化算法与十进制整数 粒子群优化算法对该模型进行优化求解,有效提升 了网架通道传输能力。虽然不能保证DG渗透率超 过80%时线路不发生阻塞,但为DG渗透率不高于 60%场景下灵活性资源的快速调度、及时响应提供 了良好的网架支撑,相比其他规划方法优越性非常 明显。对于DG渗透率超过80%的场景,如何在运 行阶段根据灵活性需求变化,实现网架操作灵活性 是本文的下一阶段研究重点。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

76

[1] 王洪坤,王守相,潘志新,等.含高渗透分布式电源配电网灵 活性提升优化调度方法[J].电力系统自动化,2018,42(15): 86-93.

WANG Hongkun, WANG Shouxiang, PAN Zhixin, et al. Optimized dispatching method for flexibility improvement of distribution network with high-penetration distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15):86-93.

- [2] 孙盛鹏,刘凤良,薛松.需求侧资源促进可再生能源消纳贡献 度综合评价体系[J].电力自动化设备,2015,35(4):77-83.
 SUN Shengpeng,LIU Fengliang,XUE Song. Comprehensive evaluation system for contribution degree of demand-side resources to renewable energy source integration[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):77-83.
- [3] 闫占新,刘俊勇,许立雄,等.风能等效转化利用模型及其效益 研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):48-54.
 YAN Zhanxin,LIU Junyong,XU Lixiong,et al. Investigation on equivalent conversion-utilization models and corresponding benefits for wind energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(6):48-54.
- [4] 王成山,李鹏,于浩. 智能配电网的新形态及其灵活性特征分析与应用[J]. 电力系统自动化,2018,42(10):13-21.
 WANG Chengshan,LI Peng,YU Hao. Development and characteristic analysis of flexibility in smart distribution network[J].
 Automation of Electric Power Systems,2018,42(10):13-21.
- [5] 马望,高红均,李海波,等.考虑智能软开关的配电网灵活性评 估及优化调度模型[J].电网技术,2019,43(11):3935-3943.
 MA Wang,GAO Hongjun,LI Haibo,et al. Flexibility evaluation and optimal dispatch model of distribution network considering soft open point[J]. Power System Technology,2019, 43(11):3935-3943.
- [6] ASENSIO M, MUÑOZ-DELGADO G, CONTRERAS J. Bi-level approach to distribution network and renewable energy expansion planning considering demand response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6):4298-4309.
- [7] 葛少云,张有为,刘洪,等.考虑网架动态重构的主动配电网双 层扩展规划[J].电网技术,2018,42(5):1526-1536.
 GE Shaoyun,ZHANG Youwei,LIU Hong, et al. Bi-layer expansion programming method for active distribution network considering dynamic grid reconfiguration[J]. Power System Technology,2018,42(5):1526-1536.
- [8] 丁明,张宇,毕锐,等.考虑集群划分的配电网网源协调扩展规 划[J/OL].电力系统及其自动化学报.[2020-11-27]. https:// doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000487.
- [9] 杨修宇,穆钢,柴国峰,等.考虑灵活性供需平衡的源-储-网--体化规划方法[J]. 电网技术,2020,44(9):3238-3246.
 YANG Xiuyu, MU Gang, CHAI Guofeng, et al. Source-storage-grid integrated planning considering flexible supply-demand balance[J]. Power System Technology, 2020,44(9):3238-3246.
- [10] 李宏仲,高字男,张雪莹,等.地区电网光伏消纳能力的提升策略[J].电力自动化设备,2018,38(7):114-120,127.
 LI Hongzhong, GAO Yunan, ZHANG Xueying, et al. Promotion strategy of photovoltaic accommodation ability for regional power grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38 (7):114-120,127.
- [11] 李佳明,李文启,鲁宗相,等.考虑系统灵活性的储能--输电线路 扩展联合规划[J/OL].中国电力.[2020-11-27].http://kns. cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200904.1103.004.html.

- [12] ZHANG C Y, DING Y, NORDENTOFT N C, et al. FLECH: a Danish market solution for DSO congestion management through DER flexibility services[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(2): 126-133.
- [13] 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.
- [14] 彭慧敏,薛禹胜,许剑冰,等.关于输电阻塞及其管理的评述
 [J]. 电力系统自动化,2007,31(13):101-107.
 PENG Huimin,XUE Yusheng,XU Jianbing, et al. A review of transmission congestion management [J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(13):101-107.
- [15] 邢海军,程浩忠,杨镜非,等.考虑多种主动管理策略的配电网 扩展规划[J].电力系统自动化,2016,40(23):70-76,167.
 XING Haijun, CHENG Haozhong, YANG Jingfei, et al. Distribution network expansion planning considering multiple active management strategies[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(23):70-76,167.
- [16] 王成山,陈恺,谢莹华,等. 配电网扩展规划中分布式电源的选 址和定容[J]. 电力系统自动化,2006,30(3):38-43.
 WANG Chengshan, CHEN Kai, XIE Yinghua, et al. Siting and sizing of distributed generation in distribution network expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems,2006, 30(3):38-43.
- [17] 沈欣炜,朱守真,郑竞宏,等.考虑分布式电源及储能配合的 主动配电网规划-运行联合优化[J].电网技术,2015,39(7): 1913-1920.
 SHEN Xinwei, ZHU Shouzhen, ZHENG Jinghong, et al. Active

distribution network planning-operation co-optimization considering the coordination of ESS and DG[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1913-1920.

 [18] 刘洪,范博宇,唐翀,等. 基于博弈论的主动配电网扩展规划 与光储选址定容交替优化[J]. 电力系统自动化,2017,41 (23):38-45,116.
 LIU Hong,FAN Boyu,TANG Chong, et al. Game theory based

alternate optimization between expansion planning of active distribution system and siting and sizing of photovoltaic and energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23):38-45,116.

[19] 王奇伟,姜飞,马瑞,等. 基于状态转移的风电并网下线路潮流 分析[J]. 电网技术,2013,37(7):1880-1886.
WANG Qiwei, JIANG Fei, MA Rui, et al. Power flow analysis of power grid connected with wind farms based on state transition[J]. Power System Technology,2013,37(7):1880-1886.

作者简介:



赵海洲(1981—),男,河北饶阳人,高 级工程师,硕士,主要研究方向为电网规划 与运行(**E-mail**:zhhqwt@126.com);

陈建凯(1993—),男,河北沧州人,硕 士研究生,通信作者,主要研究方向为弹性 配电网灵活性(E-mail;jiank_chen@163.com); 杨海跃(1982—),男,河北深州人,高

赵海洲 级工程师,硕士,主要研究方向为电网规划 与运行(**E-mail**;yhy12309@126.com)。

Expansion planning method of distribution network with distributed generation considering transmission capacity

ZHAO Haizhou¹, CHEN Jiankai², YANG Haiyue¹, LI Tieliang¹, WANG Hongkun^{2,3}, WANG Shouxiang²

(1. Hengshui Power Supply Company of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Hengshui 053000, China;

2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: In order to provide a good network transmission channel for flexibility resources to respond quickly and timely to flexibility requirements, in the planning stage, fully consider the influence of network structure and planning of DG(Distributed Generation) on distribution network transmission capacity, a bi-layer optimal method for distribution network expansion planning and DG siting and sizing considering the transmission capacity of the network channel is proposed. First, the line load margin index and power flow balance index are established to evaluate the distribution network transmission capacity. Secondly, the influence factors of the transmission capacity of the network channel are analyzed, and on this basis, a bi-layer optimal model for distribution network expansion planning and DG siting and sizing is constructed, which ensures the planning scheme has good economy and transmission capacity of network channel. And a nested hybrid particle swarm optimal algorithm is used to optimize the solution. Finally, the planning method and the economic planning method are verified by examples. The simulative results show that the proposed method not only does not increase the economic cost, but also obtains a more balanced power flow, higher line load margin and better transmission capacity.

Key words: framework expansion planning; DG siting and sizing; network transmission channel; bi-layer planning model; flexibility resources; particle swarm optimal algorithm

(上接第69页 continued from page 69)

Hierarchical-distributed optimal scheduling of hybrid AC / DC active distribution network considering source and load uncertainties

LIANG Haiping¹, WANG Yan¹, LIU Yingpei¹, WANG Xinming²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Hybrid AC / DC active distribution network represents the main development form of future distribution network. Aiming at the problems of huge computational burden, weak protection of local privacy and both source and load output uncertainties of centralized optimization for hybrid AC / DC active distribution network, a hierarchical-distributed optimal scheduling strategy of hybrid AC / DC active distribution network conside-ring the source and load uncertainties is proposed, which aims to minimize the sum of expected operating cost under both predicted and sample scenarios in the region of hybrid AC / DC active distribution network. A two-stage stochastic programming model is established in each region, and the Benders decomposition algorithm is employed to solve the main and sub problems iteratively. To protect the data privacy of each region and accomplish parallel computing, the model aims to optimize the operating cost of main problem in each region, and the synchronous alternating direction method of multipliers is utilized for the distributed calculation. In this strategy, the main problem of each region is interrelated by the inter- and intra-regional optimization problems to ensure globally optimal solutions. Finally, the case analysis validates the effectiveness of the proposed hierarchical-distributed optimal scheduling strategy.

Key words:hybrid AC / DC active distribution network;two-stage stochastic programming;Benders decomposition algorithm;synchronous alternating direction method of multipliers;hierarchical-distributed optimal scheduling 附录 A





图 A5 扩展规划网络拓扑结构图

Fig.A5 Topology structure diagram of expansion planning network

表 A2 新增负荷节点及支路数据

Table A2	Data of new	load po	oints and	branches
----------	-------------	---------	-----------	----------

支路	初始节点	末端节点	R/Ω	X/Ω	P/kW	Q/kvar	费用/万元
33	24	33	0.355 3	0.180 9	100	60	25
34	33	34	0.383 7	0.195 3	100	60	27
35	34	35	0.312 6	0.159 2	90	40	22
36	35	36	0.298 4	0.151 9	100	60	21
37	36	37	0.284 2	0.144 7	100	60	20
38	37	38	0.440 5	0.224 3	60	40	31
39	38	39	0.397 9	0.202 6	100	60	28
40	39	40	0.355 3	0.180 9	150	80	25
41	40	41	0.355 3	0.180 9	100	60	25
42	41	42	0.383 7	0.195 3	150	80	27
43	8	33	0.426 3	0.217 1			30
44	9	35	0.298 4	0.151 9			21
48	6	36	0.540 0	0.274 9			38
45	11	37	0.397 9	0.202 6			28
46	16	42	0.312 6	0.159 2			22
47	22	33	0.625 2	0.318 3			44
49	27	34	0.355 3	0.180 9			25
50	28	36	0.369 5	0.188 1			26
51	29	39	0.497 4	0.253 2			35

注:扩展规划前后 1-32 支路不会变化,因此仍按照 IEEE-33 节点系统算例进行命名;支路 33-51 在扩展规划后部分支路会缺失,为了使规划后 的线路按照 1-42 进行表示,特规定扩展规划后的支路序号命名规则为:以表 A2 线路序号首末节点为准,当规划结果缺失某条线路后,下一 线路依次递补。如原序号为 36 的支路首末节点为 35 和 36,当该条线路缺失后,则原序号为 37 的支路递补为支路 36,递补后的支路 36 首 末节点则为递补前支路 37 的首末节点,即节点 36 和 37,若该支路仍缺失,则由下一支路继续递补。规划后的支路信息具体可见表 A5。

				2 22 23 22 23 2 22 23 2 23 2 2 23 2 2 23 2 2 23 2 2 23 2 2 3 5 2 2 2 3 5 2 2 3 5 2 3 5 2 5 2	4 5 6 4 33 21 25 26 (a 4 5 6 4 33 21 25 26 (b) 注: 方框 图 A6 Plannin 表 A3 A3 Eco	7 8 9 34 35 33 5 27 28 2)方案 1 规 7 8 9 7 8 9 34 35 27 28 2)方案 2 规 示案 2 规 示案 2 规 示案 2 规 示案 2 规 示案 2 规 示案 3 6 27 28 2 0 5 2 7 8 9 7 8 9	10 11 12 3 37 38 9 30 31 3 0 9 30 31 3 0 10 11 12 38 36 37 9 30 31 3 9 30 31	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	42		
				方案 F	_{GC} /万元F _{GI}	。 /万元F _{PV} /	/万元F _{NL} /)	万元F _{GS} /万	元		
				1	28.84 15	29.57 13	4.47 65.3	35 106.7	0		
				2	33.06 14	90.63 14	4.90 45.4	43 114.9	7		
				т	表 A	4 DG 3	そ装容量 Nation oo	naaitu			
-				12	ible A4	DG Ilista	mation caj	pacity			
	方案	# = 2	# 5 10	# = 26	# = 20	DG 安表	:谷里/ KW	# = 26	# = 27	# 5 21	# = 22
-	1	卫点 2	卫点 19	卫点 26	卫点 28	7月35	卫点 9	卫点 26	卫点 27	16 点 印	卫点 32
	1	291	232	320	322	292	202	205	260	227	265
-	Z				E A 5 0 3	帕士安下	323	295 计出日	300	321	203
			Table	A5 Des	z AS 24	〒刀余 Ν of the brai	又哈庁丂 nch numb	ாரை ers of two	schemes		
方的	安	古政	初州	544 F	未端中	t into of an	方家	古政	初始	廿占	末端若占
/1/2	*	33	1/1/1	24	33	- AN	万禾	33	2	4	33
		34	3	33	34			34	3	3	34
		35	2	34 25	35			35	3	4	35
		30 37	-	35 36	36			30 37	3	/ 8	38 39
1		38	-	37	38		2	38	3	9	40
		39	-	38	39			39	4	0	41
		40	1	39	40			40	4	1	42
		41	4	40	41			41	1	1	37
		42		16	42			42	2	8	36
				表	A6 线罩	洛 1—5 蕅	I 流均衡周	度对比			
			Ta	ble A6 (Comparise	on of line	1—5 pov	ver flow b	alance		

亡安	潮流均衡度						
刀杀	线路1	线路 2	线路 3	线路 4	线路 5		
1	0.130 8	0.117 1	0.092 9	0.091 1	0.090 1		
2	0.073 2	0.067 6	0.066 0	0.064 2	0.063 3		