

考虑系统强度约束的新能源场站接入位置与容量优化研究

王奕鑫¹, 孙健¹, 高熠莹², 胡殿刚³, 马喜平⁴, 辛焕海¹

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027;

2. 中国电力科学研究院, 北京 100192;

3. 国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730000;

4. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 新能源大规模接入电网导致交流系统强度降低, 对新能源场站进行合理的选址定容规划有助于提高系统强度。为此, 通过引入广义短路比指标, 定量刻画系统强度, 并将其应用于新能源场站选址定容优化模型中。建立了以系统强度为优化目标的混合整数优化模型, 将选址定容问题分解为容量优化子问题和选址主问题, 通过广义短路比约束的等价变换, 保证了优化问题的凸性。利用广义Benders分解算法, 交替求解主、子问题, 降低了优化问题求解难度, 实现了新能源场站选址定容的最优化。仿真算例表明, 采用所提选址定容优化方法, 能够有效提高系统强度, 减少小干扰失稳风险。

关键词: 广义短路比; 选址定容; 小干扰稳定; Benders分解; 混合整数规划

中图分类号: TM712

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202512014

0 引言

随着新型电力系统建设的加快和“双碳”战略目标的不断推进, 通过电力电子变换器并网的风电、光伏等新能源装机规模正快速扩大^[1-3]。然而, 新能源渗透率的提高导致同步发电机占比持续减小, 系统强度变弱, 动态稳定性风险加剧^[4-7]。为解决上述问题, 从设备控制的角度出发, 采用改进新能源控制策略(如虚拟同步控制等^[8])增强主动支撑能力; 从电网规划的角度出发, 通过新能源场站的选址定容优化方案提升系统强度。本文关注的重点在于, 通过新能源场站落点的合理选择与容量的优化配置, 挖掘系统固有的承载潜力, 为新能源消纳提供更为经济的解决方案。系统强度的内涵丰富, 本文考量的系统强度, 侧重表征系统在遭受小扰动后, 维持母线电压稳定、避免发生振荡失稳的能力, 主要针对新能源系统在中低频段下的小干扰失稳问题。然而, 现有的电网规划研究缺乏对高比例新能源接入场景下系统强度约束与系统强度边界的量化分析, 亟需建立考虑系统强度约束的优化模型。

已有文献对新能源选址定容的合理规划进行研究。文献[9]结合光伏年收益与配电网电能质量建立了光伏容量优化模型, 利用广义Benders分解算法进行求解, 但并未涉及选址优化; 文献[10]研究了计

及静态电压稳定性的风光电站选址定容优化模型, 通过分段线性化的方法将模型化简为混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)模型, 从而提高求解效率; 文献[11]通过引入电压稳定指数、灵敏度因子等若干评价指标, 在全节点中优选出备选落点, 降低求解维度, 并采用启发式算法实现光伏电源的选址定容优化, 但启发式算法通常难以保证获得最优解。

目前计及系统强度约束的新能源选址定容优化研究并不多见。为了将系统强度约束纳入新能源规划问题中, 首要任务在于合理地表征新能源电力系统强度。文献[7]提出了广义短路比, 将其作为度量新能源多馈入系统强度的一种指标, 从而将难以量化的的小干扰稳定判别问题转化为广义短路比和临界广义短路比的计算和比较问题。以此为基础, 文献[12]利用广义短路比对光伏接入容量的灵敏度进行分析, 提出了按照等微增率分配的光伏容量优化方法, 但未考虑选址问题; 文献[13]基于广义短路比约束, 提出了一种基于参与因子的启发式算法, 每次迭代将新能源场站接入参与因子最大的节点, 但这种启发式算法难以保证选址结果达到全局最优; 文献[14]将基于广义短路比的非线性容量优化问题转化为常见的半定规划(semidefinite programming, SDP)问题, 论证了转化方法的可行性, 进而降低了模型的求解难度。

本文考虑系统强度约束, 利用结构保持下广义特征值的不变性, 将新能源场站落点问题推广至任意待选落点。以系统强度最大为优化目标, 将优化问题拆分为容量优化子问题和落点优化主问题两部分, 采用广义Benders分解算法进行求解。通过时域

收稿日期: 2025-03-09; 修回日期: 2025-11-16

在线出版日期: 2025-12-22

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5100-202355810A-3-8-KJ)

Project supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (5100-202355810A-3-8-KJ)

仿真验证了所提优化方法能够实现新能源场站容量和落点的协同优化,进而提高系统强度。

1 基于广义短路比的系统强度约束

多馈入新能源场站落点示意图如图1所示。所有新能源场站的待选落点集合 $\{1, 2, \dots, n\}$ 用于表征实际电网中风、光等自然资源富集的地区。假设规划阶段需要在 n 个待选落点中选择 k 个节点接入新能源场站。在某种落点方案确定后,图1中用实线接入交流电网的新能源场站表示实际落点,用虚线接入交流电网的新能源场站表示未被选中的待选落点。节点 $\{n+1, n+2, \dots, n+m\}$ 表示电网中除了待选落点以外的无源节点集合,节点 $n+m+1$ 为无穷大节点。本文中假设传输线路均为感性。

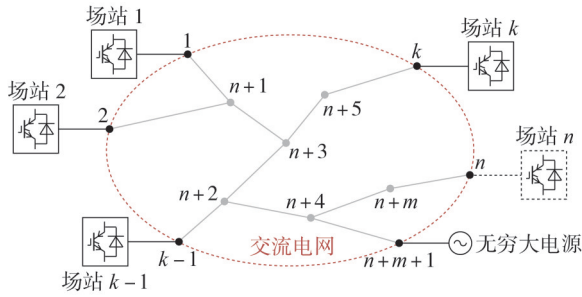


图1 多馈入新能源场站落点示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi-infeed renewable energy stations

由图1可得3种节点导纳矩阵,即全阶的节点导纳矩阵 B_{all} 、从所有待选落点向交流电网看去的降阶节点导纳矩阵 B_{red} 以及从新能源场站实际落点向交流电网看去的降阶节点导纳矩阵 B_0 。3种节点导纳矩阵的关系如式(1)、(2)所示^[15-16],其中带上标的矩阵表示该矩阵对应的分块子矩阵。

$$\begin{cases} B_{all} \in \mathbb{R}^{(n+m+1) \times (n+m+1)}, B_{red} \in \mathbb{R}^{n \times n}, B_0 \in \mathbb{R}^{k \times k} \\ B_{red} = B_{all}^{n, n} - B_{all}^{n, m+1} (B_{all}^{m+1, m+1})^{-1} B_{all}^{m+1, n} \\ B_0 = B_{red}^{k, k} - B_{red}^{k, n-k} (B_{red}^{n-k, n-k})^{-1} B_{red}^{n-k, k} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} B_{all} = \begin{bmatrix} B_{all}^{n, n} & B_{all}^{n, m+1} \\ B_{all}^{m+1, n} & B_{all}^{m+1, m+1} \end{bmatrix} \\ B_{red} = \begin{bmatrix} B_{red}^{k, k} & B_{red}^{k, n-k} \\ B_{red}^{n-k, k} & B_{red}^{n-k, n-k} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

假设 $S_0 = \text{diag}(S_1, S_2, \dots, S_k)$ 表示由新能源场站额定容量构成的对角矩阵,矩阵中的元素表示各新能源场站的额定容量。此前研究表明拓展导纳矩阵 $S_0^{-1} B_0$ 的最小特征值即为广义短路比 ξ_{gSCR} ,其能够较好地量化新能源多馈入系统强度^[17]。 ξ_{gSCR} 的计算表达式为:

$$\xi_{gSCR} = \lambda_{\min}(S_0^{-1} B_0) \quad (3)$$

式中: $\lambda_{\min}(\cdot)$ 表示求取矩阵的最小特征值。

若用零矩阵扩充 S_0 ,使得扩充后的容量矩阵 S_{red} 和 S_{all} 的维度分别与导纳矩阵 B_{red} 和 B_{all} 保持一致,则可以证明以下等式成立:

$$\begin{cases} S_{red} = \begin{bmatrix} S_0 & \\ & Z_0 \in \mathbb{R}^{(n-k) \times (n-k)} \end{bmatrix} \\ S_{all} = \begin{bmatrix} S_0 & \\ & Z_0 \in \mathbb{R}^{(n-k+m+1) \times (n-k+m+1)} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

$$\xi_{gSCR} = \lambda_{\min}(S_0^{-1} B_0) = \lambda_{\min}(B_0, S_0) = \lambda_{\min}(B_{red}, S_{red}) = \lambda_{\min}(B_{all}, S_{all}) \quad (5)$$

式中: Z_0 为全0矩阵; $\lambda_{\min}(\cdot)$ 为矩阵的最小(广义)特征值; $\lambda_{\min}(X, Y)$ 为矩阵 X 相对于矩阵 Y 的最小非零广义特征值,该证明过程见附录A式(A1)~(A6)。

由式(5)可知,任意落点方案下的广义短路比等价于全阶系统或降阶系统下的广义特征值。如果落点方案发生变化,则仅修改式(4)中对角元素的排列顺序即可方便地计算出任意落点方案下的广义短路比。广义短路比的这一性质为选址定容规划问题提供了便利。因此为了方便表述,后文建立优化问题时,统一采用 $\lambda_{\min}(B_{red}, S_{red})$ 作为广义短路比的基准计算公式。

值得一提的是,临界广义短路比 ξ_{CgSCR} 被定义为保证系统小干扰稳定的最小广义短路比,因其主要由新能源控制动态决定,故也称其为设备临界短路比。 ξ_{CgSCR} 的计算表达式为^[14]:

$$\xi_{CgSCR} = \arg \left[\det \left(Y_c(s) + \xi_{gSCR} F^{-1}(s) \right) = 0 \right]_{s=j\omega_s} \quad (6)$$

式中:符号 $\arg[\cdot]$ 表示使得方程成立的解; ω_s 为系统临界稳定下的主导模态角速度,一般落在零点或虚轴上; $Y_c(s)$ 为新能源场站的频域导纳矩阵(假设新能源控制结构都是同构的,即各新能源场站的 $Y_c(s)$ 均相同); $F(s)$ 为交流网络的动态矩阵,假设 ω_0 为工频角速度,有式(7)成立。

$$F(s) = \begin{bmatrix} s/\omega_0 & -1 \\ 1 & s/\omega_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

显然, ξ_{gSCR} 与 ξ_{CgSCR} 的差值 $\Delta_s = \xi_{gSCR} - \xi_{CgSCR}$ 量化了系统小干扰稳定裕度。当 $\Delta_s > 0$ 时,系统小干扰稳定,构成了本文中系统强度最基本的约束条件。

2 新能源场站选址定容优化问题

本文研究“如何优化新能源场站的落点及容量分配使系统强度最大”的问题。具体为:给定并网系统网络参数、新能源场站控制参数和设备总容量、系统强度约束等,优化新能源场站的落点选址方案以及合理分配容量,使得并网系统强度最大。

假设采用0-1变量 $l_i \in \{0, 1\} (i=1, 2, \dots, n)$ 表示第 i 个待选落点是否接入新能源场站,其取值为0表示不接入,取值为1表示接入。上述优化问题可以表示为:

$$\begin{cases} \max \Delta_s = \lambda_{\min}(\mathbf{B}_{\text{red}}, \mathbf{S}_{\text{red}}) - \xi_{\text{CgSCR}} \\ \text{s.t. } \mathbf{S}_{\text{red}} = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_n) \\ s_i = l_i S_i, l_i \in \{0, 1\} \\ \sum_{i=1}^n l_i = k, \sum_{i=1}^n s_i = S_{\Sigma} \end{cases} \quad (8)$$

式中: s_i 为由变量 l_i 决定的第 i 个落点接入新能源场站的实际容量; S_{Σ} 为给定的新能源场站容量总和。

由式(8)可知, 优化问题包含了整数变量 l_i 以及广义特征值的计算, 构成了一种非线性整数优化问题, 使得该问题难以直接求解。为了解决该问题, 首先需要对优化问题进行化简。注意到优化目标 $\Delta_s = \xi_{\text{gSCR}} - \xi_{\text{CgSCR}}$ 中, ξ_{CgSCR} 仅由设备动态决定, 因而在优化过程中保持不变, 可以将其省略, 仅保留 $\lambda_{\min}(\mathbf{B}_{\text{red}}, \mathbf{S}_{\text{red}})$ 。又根据矩阵相关知识, 矩阵的最小特征值等于其逆矩阵的最大特征值的倒数, 即 $\lambda_{\min}(\mathbf{B}_{\text{red}}, \mathbf{S}_{\text{red}}) = 1/\lambda_{\max}(\mathbf{S}_{\text{red}}, \mathbf{B}_{\text{red}})$, 其中 $\lambda_{\max}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 为矩阵 $\mathbf{X}$ 相对于矩阵 $\mathbf{Y}$ 的最大非零广义特征值。因此, 式(8)可被改写为最小化问题:

$$\begin{cases} \min \lambda_{\max}(\mathbf{S}_{\text{red}}, \mathbf{B}_{\text{red}}) \\ \text{s.t. } \mathbf{S}_{\text{red}} = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_n) \\ s_i = l_i S_i, l_i \in \{0, 1\} \\ \sum_{i=1}^n l_i = k, \sum_{i=1}^n s_i = S_{\Sigma} \end{cases} \quad (9)$$

通过引入辅助变量 t , 式(9)可进一步转化为混合整数半定规划 (mixed-integer semidefinite programming, MISDP) 问题^[18]:

$$\begin{cases} \min t \\ \text{s.t. } t\mathbf{B}_{\text{red}} - \mathbf{S}_{\text{red}} \geq 0 \\ \mathbf{S}_{\text{red}} = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_n) \\ s_i = l_i S_i, l_i \in \{0, 1\} \\ \sum_{i=1}^n l_i = k, \sum_{i=1}^n s_i = S_{\Sigma} \end{cases} \quad (10)$$

式中: 辅助变量 t 在数值上等于 ξ_{gSCR} 的倒数; 符号 $\geq$ 表示矩阵偏序。

观察式(10)不难看出, 假如将整数变量 l_i 松弛为任意实数, 则优化问题退化为SDP问题, 使用市面上常见的优化求解器即可直接求解。不妨设松弛后的优化目标最优值为 $\underline{t}^*$ 。显然, 优化变量的松弛过程相当于放大了可行域, 因此松弛后的最优值 $\underline{t}^*$ 构成了原问题最优值 t^* 的一个下界。

另一方面, 假如人为给定一组整数 l_i , 式(10)所示优化问题同样退化为SDP问题。类似地, 不妨设此时的优化目标最优值为 $\bar{t}^*$ 。优化问题经过人为干涉后, 优化变量的可行域发生了收缩, 因此收缩后的最优值 $\bar{t}^*$ 构成了原问题最优值 t^* 的一个上界。

综合上述分析, 式(10)所示优化问题的最优值满足:

$$\underline{t}^* \leq t^* \leq \bar{t}^* \quad (11)$$

显然, 下界 $\underline{t}^*$ 和上界 $\bar{t}^*$ 易于求解, 若能找到一种算法使得 $\bar{t}^* - \underline{t}^* \rightarrow 0$, 则原问题的最优值 t^* 即可间接求得, 从而规避复杂的求解过程。事实上, 上述分析思路正是广义Benders分解算法的基本思想, 在第3章中将会对基于广义Benders分解的选址定容优化问题的求解过程进行介绍。

3 基于广义Benders分解的求解过程

原则上, 遍历所有可能的新能源场站落点方案, 对应修改矩阵 $\mathbf{S}_{\text{red}}$, 对每一种落点方案都求解一次收缩后的SDP问题, 比较所有的最优值 $\bar{t}^*$, 选择其中最小的一个即为最优选址定容方案。然而, 随着待选落点个数 n 增大, 可能的落点方案数会急剧增大, 继而出现组合爆炸的问题。因此, 需要采用更合适的求解算法来规避该问题。

采用广义Benders分解算法可以将式(10)的MISDP问题分解为包含复杂整数变量的MILP松弛主问题和简化的SDP子问题。这里简化子问题的含义为: 一旦原问题中的复杂整数变量被固定, 原问题就可以被简化为更易求解的子问题。显然, 主问题的解决决定了每次迭代的最优落点, 子问题的解则给出了该落点方案下的最优容量分配结果。两者交替迭代即可提高求解效率。

3.1 容量优化子问题

广义Benders分解的子问题如式(12)所示。

$$\begin{cases} \min t \\ \text{s.t. } t\mathbf{B}_{\text{red}} - \mathbf{S}_{\text{red}} \geq 0 \\ \mathbf{S}_{\text{red}} = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_n) \\ s_i = l_i S_i, \sum_{i=1}^n s_i = S_{\Sigma} \\ l_i = \beta_i^j, L_j = \{\beta_i^j | \forall i\} \end{cases} \quad (12)$$

式中: β_i^j 为第 j 次迭代时, 第 i 个节点的落点情况; L_j 为第 j 次迭代所有 β_i^j 的集合。

由于子问题中落点确定, 因此优化变量只有设备容量, 故子问题也被称为容量优化子问题^[19]。基于广义Benders分解理论, 根据子问题是否有可行解, 则回补给主问题不同的割平面。观察式(12)易知, 当 L_j 固定后, 该问题的优化目标和约束条件均为凸函数, 如式(12)所示的优化问题为凸优化问题, 子问题一定可行, 故只需要考虑回补最优割^[20]。

最优割的设计多种多样, 然而由于式(12)涉及到0-1变量, 且该整数变量集成于容量矩阵 $\mathbf{S}_{\text{red}}$ 中, 计算其对偶变量非常困难, 因此难以采用经典Benders分解的对偶最优割。本文采用的最优割表达式为^[21]:

$$t \geq \bar{t}_j^* - \underbrace{(\bar{t}_j^* - t_0)}_{\nabla_i} \underbrace{\left[\sum_{i:\beta_i^j=0} l_i + \sum_{i:\beta_i^j=1} (1-l_i) \right]}_{\Delta l} \quad (13)$$

式中: $\bar{t}_j^*$ 为第 j 次迭代时子问题的最优值; t_0 为 l_i 松弛取任意实数后的子问题最优值; Δl 为某种落点方案下整数变量与第 j 次迭代时整数变量之间的差分量; ∇_i 定义为该差分量的梯度; $i:\beta_i^j=0$ 、 $i:\beta_i^j=1$ 分别表示 β_i^j 取 0、1 对应的变量 i 。

3.2 松弛主问题

广义 Benders 分解的松弛主问题如式 (14) 所示。

$$\begin{cases} \min t \\ \text{s.t. } l_i \in \{0, 1\}, \sum_{i=1}^n l_i = k \\ t \geq \bar{t}_j^* - \nabla_i \Delta l \end{cases} \quad (14)$$

由式 (14) 可见, 松弛主问题中仅保留了整数变量 l_i , 从而简化为 MILP 问题。每一次迭代, 求解主问题得到 1 组可行的 L_j 和最优值下界 $\bar{t}_j^*$, 并输入子问题; 子问题求解得到最优值上界 $\bar{t}_j^*$, 并回补给主问题 1 个最优割; 反复迭代直至上、下界收敛至全局最优值 t^* 。上述过程可用附录 B 图 B1 表示, 由图 B1 可见, 广义 Benders 分解通过最优割和 L_j 实现了主问题和子问题之间的信息交换。

值得一提的是, 随着迭代次数增加, 最优割的数量也不断增多, 导致每次迭代中松弛主问题的求解速度越来越慢。此外, 松弛主问题解得的落点方案 L_j 会直接影响上界 $\bar{t}_j^*$ 的下降速度, 不恰当的 L_j 可能致使上界 $\bar{t}_j^*$ 长时间陷于局部最优。因此需要对每次迭代中 L_j 的搜索方向加以限制, 如式 (15) 所示。

$$\Delta l = 2 \quad (15)$$

根据 Δl 的定义可知, 未加限制时其取值范围为闭区间 $[0, 2k]$, 意味着其搜索范围为任意一种落点方案的集合。通过引入式 (15), 将 L_j 下一次迭代的搜索范围局限在其邻域 $\phi(L_j)$ 内。这里邻域 $\phi(L_j)$ 的含义为对 L_j 进行简单变换 (例如仅一次交换集合中 0 和 1 元素的位置) 得到的所有集合, 如图 2 所示。需要注意的是, 式 (15) 在主问题求解完成后必须被剔除, 并在下一次迭代开始时重新投入。

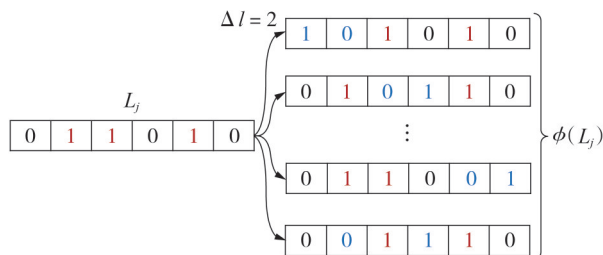


图2 L_j 的邻域示意图

Fig.2 Diagram of neighborhood of L_j

综上所述, 广义 Benders 优化算法求解步骤具体如下。

步骤 1: 考虑式 (15), 求解式 (14) 所示松弛主问题, 找到 1 组 L_j 并输入式 (12) 所示子问题, 更新下界最优值 B_L , 剔除式 (15), 前往步骤 2。

步骤 2: 求解式 (12) 所示子问题, 更新上界最优值 B_U , 根据式 (13) 回补给主问题最优割, 前往步骤 3。

步骤 3: $j=j+1$, 若 $\bar{t}_j^* = \bar{t}_{j-1}^*$, 则输出最优选址定容方案; 否则, 回到步骤 1。

4 算例分析

考虑如附录 B 图 B2 所示的 IEEE 39 节点系统, 该系统中节点 36 为无穷大电网, 假设节点 30—35、37—39 被选为待选落点。现需要在上述 9 个待选落点中接入 3 座新能源场站。假设新能源场站均采用电流内环-直流电压外环控制, 并且每台新能源以自身容量为基准值进行标幺化后的控制参数均相同。新能源控制结构及控制参数分别见附录 B 图 B3 和表 B1。

由于临界广义短路比仅由设备控制结构及控制参数决定, 通过实验或理论推导的方法均可获得其准确数值。将表 B1 给出的控制参数代入式 (6) 进行计算, 可得临界广义短路比数值为 2.649。

4.1 容量优化子问题

容量优化子问题是选址定容规划问题的基础, 因此首先验证该问题的可行性。假设某种落点方案选择节点 31、33、37 接入新能源场站, 3 座新能源场站的总容量为 6 p.u., IEEE 39 节点系统的节点导纳矩阵可根据 MATPOWER 标准测试案例库获得。首先考虑等容量接入情形, 即每座新能源场站的额定容量均为 2 p.u.。由广义短路比定义可知, 此时 ξ_{gSCR} 为 2.485, 其值小于 2.649, 系统小干扰失稳。将以上数据代入式 (12), 利用 MATLAB 中的 YALMIP 优化工具包进行求解, 可得在此落点方案下 3 座新能源场站的最优容量分配分别为 1.798、3.025、1.177 p.u.。优化后广义短路比提升到 2.619, 仍小于 2.649, 这表明在此落点方案下, 即使进行了容量优化, 仍无法保证小干扰稳定。该算例说明只依靠容量优化在提升系统强度上存在一定的局限性。

该算例中优化前、后系统特征根分布如图 3 所示, 图中特征根的具体数值由附录 B 表 B2 给出。由图 3 可知, 经过容量优化分配, 系统主导特征根从 $0.385 \pm j62.972$ 左移至 $0.065 \pm j62.941$, 说明系统小干扰稳定性得到了一定的改善, 但未能越过虚轴抵达负半平面, 系统仍处于小干扰失稳。

利用时域仿真进一步验证上述结论, 考虑 0.2 s 时在节点 36 处施加 2% 的电压扰动, 并在 0.22 s 时将

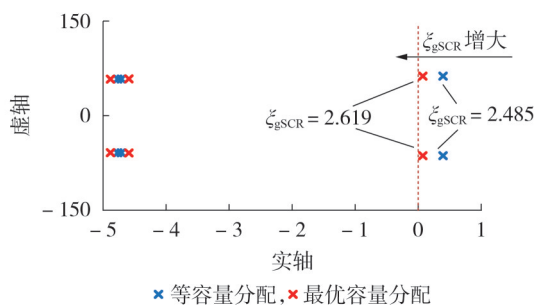


图3 优化前、后主导特征根分布对比

Fig.3 Comparison of eigenvalues distribution before and after optimization

扰动切除,容量优化前、后节点33处的新能源场站输出有功功率 P_e 的动态响应曲线如图4所示。为了方便对比,图4中有功功率曲线均按照其额定容量进行归一化和标幺化处理,后同。由图可知:容量优化前,有功功率出现发散振荡,系统小干扰失稳;容量优化后,有功功率近似出现等幅振荡,说明此时较为接近临界稳定状态,与图3所示主导特征根分布保持一致。

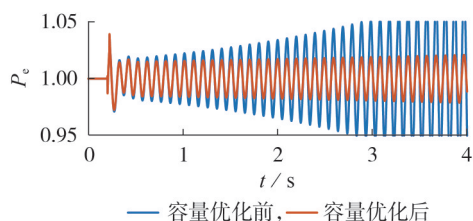


图4 容量优化前、后有功功率对比

Fig.4 Comparison of active power before and after capacity optimization

4.2 选址定容规划

考虑将4.1节算例落点方案作为初始值,将各参数代入式(10)给出的选址定容优化模型并采用广义Benders分解算法求解。假设新能源场站总容量仍为6 p.u.,每次迭代时最优值 t^* 上、下界的计算结果如图5所示。图中: B_{U1} 、 B_{U2} 和 B_{L1} 、 B_{L2} 分别为非定向搜索和定向搜索的上、下界最优值。由图可知:全局最优值 t^* 为0.262 8,即广义短路比 $\xi_{gSCR}=1/t^*\approx 3.806$,

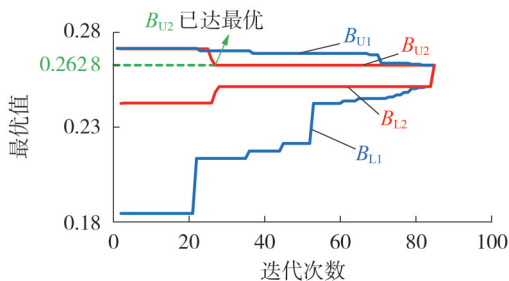


图5 最优值的上、下界迭代过程

Fig.5 Iterative process of upper bound and lower bound for optimal value

其值大于2.649,系统小干扰稳定。利用式(15)定向搜索后,上、下界收敛速度明显加快。此时最优选址方案为节点30、33、35,3座新能源场站的最优容量分配分别为0.906、1.172、3.922 p.u.。

选址定容优化后系统特征根的分布和节点33处新能源场站输出有功功率的动态响应曲线分别如图6和图7所示。由图6可知,此时系统主导特征根为 $\lambda_{1,2}=-2.962\pm j62.578$,落在负半平面,说明系统稳定且具有一定的小干扰稳定裕度。图7表明经过扰动后新能源场站有功功率快速收敛,验证了本文所提选址定容优化方法的有效性。

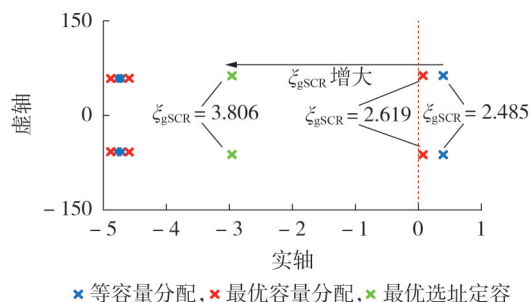


图6 选址定容优化后特征根分布

Fig.6 Eigenvalues distribution after site and capacity optimization

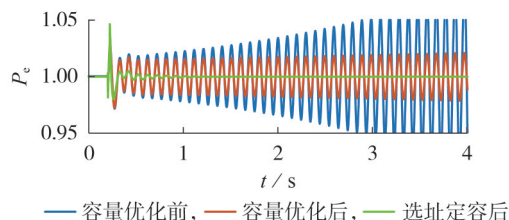


图7 选址定容优化后有功功率响应

Fig.7 Active power response after site and capacity optimization

对比4.1节的容量优化算例和本节的选址定容优化算例可知,单纯依靠容量优化无法充分挖掘系统承载新能源的潜力,在最优情况下,广义短路比仅提高了5.4%。然而,经过选址定容优化后,广义短路比提高了53.2%,系统强度明显提升。

值得一提的是,在最优选址结果上,更大的稳定裕度意味着系统能够承载更大容量的新能源场站。因此在选址优化结束后,若希望进一步提高新能源场站接入容量,则可以再另建立1组容量优化模型,其目标函数为使新能源场站总容量最大,如附录B图B4所示。因此,采用本文所提的选址定容优化方法后,一方面提高了系统整体的稳定裕度,另一方面为增加新能源场站接入容量提供了进一步优化的空间。

4.3 考虑新能源机组出力波动性的实际输出功率

新能源机组出力波动性是实际新能源的显著特性。为了说明新能源机组出力波动性对小干扰稳定

的影响,本文考虑在直流母线实际输入功率上叠加一定程度的白噪声来模拟新能源机组出力的随机波动。

以选址定容后的新能源接入方案为例,在节点33处的直流功率控制环节上叠加一定程度的白噪声,如附录B图B5所示。作为对照组,节点30、节点35处的新能源场站保持原本的控制方式不变。考虑出力波动性后节点30、节点33、节点35处新能源场站实际输出功率的变化曲线如附录B图B6所示。由图B6可知,节点33处新能源场站受出力波动性影响导致实际输出功率始终处于波动中,但由于选址定容后,新能源系统强度得到了有效提升,故节点33输出功率虽然不断波动,但始终能维持在1 p.u.附近且不失稳,这验证了本文所提优化方法的有效性。节点30和节点35处新能源场站虽同样受节点33处新能源场站出力波动影响,但从图B6所示结果来看,这种影响导致的功率波动几乎可以忽略不计。

5 结论

广义短路比和临界广义短路比的差值量化了系统的稳定裕度。本文利用广义短路比在结构保持网络下的特殊性质,构建了一种适用于新能源场站选址定容规划的系统强度约束条件。在此基础上,提出了一种基于广义短路比的混合整数优化模型,并给出了对应的广义Benders分解算法。仿真结果表明,经过优化,系统强度提升了53.2%。所提方法为新能源规划和小干扰稳定校核提供了一种新的思路。考虑电压稳定、频率稳定等多维系统强度约束的新能源规划问题将是未来进一步研究的方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 舒印彪,赵勇,赵良,等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报,2023,43(5):1663-1672.
SHU Yinbiao,ZHAO Yong,ZHAO Liang,et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(5):1663-1672.
- [2] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
ZHUO Zhenyu,ZHANG Ning,XIE Xiaorong,et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(9):171-191.
- [3] 滕贤亮,谈超,昌力,等. 高比例新能源电力系统有功功率与频率控制研究综述及展望[J]. 电力系统自动化,2023,47(15):12-35.
TENG Xianliang,TAN Chao,CHANG Li,et al. Review and prospect of research on active power and frequency control in power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(15):12-35.
- [4] IEEE SA Standards Board. IEEE standard for interconnection and interoperability of inverter-based resources(IBRs) interconnecting with associated transmission electric power systems: IEEE Std 2800-2022[S]. New York:IEEE,2022.
- [5] 王冠中,王巍,史千弘,等. 多机系统锁相振荡模式的数值域稳定判据[J]. 电力自动化设备,2024,44(10):85-91,139.
WANG Guanzhong,WANG Wei,SHI Qianhong,et al. Numerical range stability criterion for PLL oscillation mode of multi-converter system[J]. Electric Power Automation Equipment,2024,44(10):85-91,139.
- [6] 吴林林,苏田宇,卜海棠,等. 复杂网络下多分布式新能源集群小信号等值建模方法[J]. 电力系统自动化,2025,49(12):69-78.
WU Linlin,SU Tianyu,BU Haitang,et al. Small-signal equivalent modeling method for multiple distributed renewable energy clusters under complex network[J]. Automation of Electric Power Systems,2025,49(12):69-78.
- [7] 辛焕海,董炜,袁小明,等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报,2016,36(22):6013-6027.
XIN Huanhai,DONG Wei,YUAN Xiaoming,et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices in-feed to power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(22):6013-6027.
- [8] 迟永宁,江炳蔚,胡家兵,等. 构网型变流器:物理本质与特征[J]. 高电压技术,2024,50(2):590-604.
CHI Yongning,JIANG Bingwei,HU Jiabing,et al. Grid-forming converters: physical mechanism and characteristics [J]. High Voltage Engineering,2024,50(2):590-604.
- [9] 陈卓,郭寅远,温彦军,等. 基于广义Benders分解的分布式光伏接入容量规划方法[J]. 浙江电力,2024,43(6):31-40.
CHEN Zhuo,GUO Yinyuan,WEN Yanjun,et al. An integration capacity planning method for distributed photovoltaic sources based on generalized Benders decomposition[J]. Zhejiang Electric Power,2024,43(6):31-40.
- [10] 路亮,魏明奎,张怀远,等. 计及静态电压稳定性的风光电站选址定容协同规划方法[J]. 电力自动化设备,2024,44(1):95-102.
LU Liang,WEI Mingui,ZHANG Huaiyuan,et al. Coordinated siting and sizing planning method of wind and photovoltaic power stations considering static voltage stability[J]. Electric Power Automation Equipment,2024,44(1):95-102.
- [11] 刘柳,赵俊勇,马亮. 基于改进蝴蝶算法的分布式光伏选址定容[J]. 电力系统及其自动化学报,2023,35(8):152-158.
LIU Liu,ZHAO Junyong,MA Liang. Locating and sizing of distributed photovoltaic generation based on improved butterfly optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPAS,2023,35(8):152-158.
- [12] 黄锐,兰洲,辛焕海,等. 基于广义短路比的光伏多馈入系统容量优化方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(3):147-154.
HUANG Rui,LAN Zhou,XIN Huanhai,et al. Capacity optimization method for multi-infeed photovoltaic system based on generalized short circuit ratio[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(3):147-154.
- [13] 吴琛,刘晨曦,黄伟,等. 提升新能源电力系统稳定性的构网型变流器选址定容方法[J]. 电力系统自动化,2023,47(12):130-136.
WU Chen,LIU Chenxi,HUANG Wei,et al. Siting and sizing method of grid-forming converters for improving stability of power system with renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(12):130-136.
- [14] YUAN H,XIN H H,WU D,et al. Assessing maximal capacity of grid-following converters with grid strength constraints [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2022,13(4):2119-2132.
- [15] DORFLER F,BULLO F. Kron reduction of graphs with applica-

- tions to electrical networks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I:Regular Papers,2013,60(1):150-163.
- [16] PLOUSSARD Q,OLMOS L,RAMOS A. An efficient network reduction method for transmission expansion planning using multicut problem and kron reduction[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(6):6120-6130.
- [17] DONG W,XIN H H,WU D,et al. Small signal stability analysis of multi-infeed power electronic systems based on grid strength assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2019,34(2):1393-1403.
- [18] PENG Y,WU Z,GU W,et al. Optimal micro-PMU placement for improving state estimation accuracy via mixed-integer semi-definite programming[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2023,11(2):468-478.
- [19] 孙荣富,袁辉,王小路,等. 考虑小干扰同步稳定约束的电网新能源承载能力评估方法[J]. 电力系统自动化,2023,47(17):47-56.
- SUN Rongfu,YUAN Hui,WANG Xiaolu,et al. Assessment method for accommodable renewable energy capacity of grid considering small-signal synchronous stability constraints[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(17):47-56.
- [20] BOYD S,VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. New York: Cambridge University Press,2009:121-130.
- [21] 殷允强,王杜娟,余玉刚. 整数规划:基础、扩展及应用[M]. 北京:科学出版社,2022:240-243.

作者简介:

王奕鑫(1997—),男,博士研究生,主要研究方向为新能源电力系统稳定分析与优化(E-mail:11910060@zju.edu.cn);

辛焕海(1981—),男,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为新能源电力系统稳定分析与控制(E-mail:xinhh@zju.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Research on connection location and capacity optimization of renewable energy stations considering system strength constraints

WANG Yixin¹,SUN Jian¹,GAO Yiyang²,HU Diangang³,MA Xiping⁴,XIN Huanhai¹

(1. College of Electrical Engineering,Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

3. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730000, China;

4. Electric Power Research Institute of State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The large-scale integration of renewable energy sources into the power grid leads to the weakening of AC system strength. The reasonable planning of the siting and sizing of renewable energy stations can help enhance system strength. Therefore, a generalized short circuit ratio(gSCR) index is introduced to quantitatively characterize the system strength, which is then incorporated into an optimization model for the siting and sizing of renewable energy stations. A mixed-integer optimization model is established with system strength as the optimization objective. The problem of siting and sizing is decomposed into a capacity optimization subproblem and a siting master problem. By the equivalent transformation of generalized short-circuit ratio constraints, the convexity of the optimization problem is ensured. The generalized Benders decomposition algorithm is employed to alternately solve the master problem and subproblem, which reduces the difficulty of solving the optimization problem and achieves the optimal siting and sizing of renewable energy stations. The simulation cases show that the proposed optimization method effectively enhances system strength and reduces the risk of small-signal instability.

Key words: generalized short circuit ratio; siting and sizing; small-signal stability; Benders decomposition; mixed integer programming