Vol.43 No.8 Aug. 2023

基于潮流、可靠性线性化分析的海上风电场 集电系统集中式拓扑优化

王邦彦1,王秀丽1,帅轩越1,王一飞1,王 帅2,辛超山3

(1. 西安交通大学 电气工程学院(陕西省智能电网重点实验室),陕西 西安 710049;

2. 国网经济技术研究院有限公司,北京 102209;3. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院,新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要:海上风电是新型电力系统的重要支撑,其集电系统需要大量昂贵海缆,占总成本比重较高,优化规划较为困难。为此,提出适宜集电系统的含网损线性潮流模型,基于决策变量构建潮流约束。考虑开关的优化配置,将可靠性综合成本引入模型,并对场景进行解耦,基于网络流模型构建故障功率流变量实现具有可靠性的数学约束化建模分析。综合多方面成本建立集电系统规划模型,将风机聚类后,进行集中式优化得到最优的拓扑设计。同时,提出标准成本的概念以综合评判设计方案与求解模型的优劣。最后,通过该方法与现有方法的算例对比,说明该方法得到的方案具有更低的标准成本,该模型具有更好的计算精度。综上,所提出的模型及方法更适宜于集电系统的规划分析问题。

DOI:10.16081/j.epae.202302010

0 引言

构建新型电力系统与2030碳达峰、2060碳中和 两项任务将会促进可再生能源持续高速发展。风能 作为可再生能源的重要组成部分,已经得到了大规 模的开发。2021年年底我国并网风电容量达到了 3.3×10⁸ kW,较2020年增长了16.6%^[1]。由于海上具 有更加充沛的未开发风能,海上风电是更具前景的 发展方向。2021年全球海上风电并网装机容量增 加了21.1 GW,我国的装机增量占据了全球的80%, 连续4年居世界第一位^[2]。随着沿海大省纷纷将海 上风电发展写入"十四五"规划,海上风电将在未来 持续蓬勃发展。

海上风电场一般具有20~25 a的项目周期,建设 投资巨大,需要合理规划风电场的建设方案以达到 更好的经济性^[3]。集电系统承担了汇集风机发出的 电能的任务,将电能通过大量千米级海底电缆汇流 至中压母线,随后由送出系统进行传输并网。集电 系统的建设成本可达到风电场总成本的15%~ 30%^[4]。除投资成本外,故障损失、网损等电量损失 成本也应考虑在集电系统的全寿命周期成本之 中^[5]。由于集电系统拓扑复杂多变,且拓扑和可靠 性问题、潮流问题存在紧密的耦合,综合考虑上述成 本的规划问题十分复杂。实际工程中常采用链形拓 扑进行简单设计,但是这样的设计方案的经济性必

收稿日期:2022-08-14;修回日期:2022-11-06 在线出版日期:2023-02-09

基金项目:国家电网公司科技项目(5100-202056458A-0-0-00) Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(5100-202056458A-0-0-00) 然不能达到最优。寻找最佳的拓扑设计方案为一个 全局优化问题。集电系统拓扑规划中的可行解空间 极大,所以部分研究采用智能算法进行求解,如遗传 算法^[6]。但是智能算法的使用不能保证解的精度。 此外,有大量研究采用聚类算法^[7]进行风机聚类分 组,削减搜索空间,提高求解效率。大部分研究应用 了 CPLEX、Gurobi等商业求解器进行求解^[8]。混合 整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)模型是求解此问题的基础模型^[9-12],部分研究 构建了混合整数二次规划(mixed integer quadratic programming, MIQP)模型以更加精确地计算网损^[13]。 由于潮流约束的非线性,采用完整的交流潮流模型 将使整体模型变为一个混合整数非线性规划模型, 求解较为困难^[14]。除此之外,许多研究提出采用迭 代的方法求解拓扑规划问题^[11-12]。

在可靠性方面,海上风电场不同于陆上风电场, 运行工况恶劣,受大风大浪天气的影响,可靠性问题 尤为突出^[15-16],风电机组的实时数据采集与可靠性 监测较为困难^[17]。电缆故障导致的电量损失在运行 成本中占据了一定比例。配置断路器以隔离故障是 提高海上风电场的可靠性,减少故障损失的重要方 法^[18]。有研究指出部分开关配置方式相较于传统开 关配置方式和完全开关配置方式具有更高的经济 性^[19]。更进一步地,若希望系统整体经济性达到最 优,则应建立开关优化配置模型进行分析^[20]。若在 规划模型的目标函数中引入可靠性相关的成本,则 可以避免反复校核调整,直接得出经济性最优的方 案^[21]。值得注意的是,目前针对集电系统优化规划 已有大量的研究,但仍存在以下不足之处:①已有研 究建立的潮流模型较为粗略,以仅考虑有功的无网 损线性潮流(即传输模型^[8])为主;②尚未有研究将 开关配置作为变量引入集电系统拓扑优化问题,忽 略了此方面的成本优化空间;③尚未有研究评估潮 流模型、开关优化对优化模型计算精度、寻优能力的 影响。鉴于此,本文开展了相关针对性研究,主要贡 献及创新点如下:基于提出的含网损线性潮流模型 构建了潮流约束,提升了计算精度;提出故障功率流 模型,通过数学约束计算集电系统可靠性;提出了标 准成本的概念以分析各模型的优劣。

1 含网损线性潮流建模及分析

海上风电场集电系统大多呈放射状结构,无论 是拓扑还是电压等级都与配电网非常相似。假设集 电系统仅具有一个汇流站且拓扑为放射状,则可利 用配电网的特性进行类比分析。

由于海上风电场集电系统具有确定的最大运行 方式,工程设计中电缆往往采取最小化截面的选型。 电缆电阻引起的电量损失成本在20余年的项目周 期中叠加,占据总成本的部分比例,因而不能忽视。 为此,应当合理选择所有电缆的截面,使得系统投资 成本与网损成本达到综合最低。而对于网损成本的 分析需进行所有运行方式下的潮流计算。为了构成 集中式优化架构,需对潮流模型进行线性化。本文 根据集电系统的特点,基于线性潮流模型构建了面 向优化问题的考虑拓扑不确定的潮流约束。

1.1 复数量的近似

文献[22]提出了一种计算电压的线性潮流模型,将配电网中节点电压表示为节点注入复功率的线性函数:

$$\hat{U} = U_0 \left(E + \hat{Z} \hat{S}^* / U_0^2 \right)$$
(1)

式中: \hat{U} 为不包括平衡节点的 $(n-1)\times1$ 维电压向量, n为配电网节点总数; U_0 为平衡节点电压幅值;E为 元素全是1的向量; \hat{Z} 为由部分导纳阵取逆得到的 $(n-1)\times(n-1)$ 维阻抗矩阵; \hat{S} 为 $(n-1)\times1$ 维节点注入 复功率向量;上标"*"表示取共轭。考虑集电系统的 特点,该关系可进行简化和重新推导。

首先,集电系统中仅有风机作为电源,且风机发 出的功率几乎全为有功功率。由于电抗产生的无功 功率相对风机发出的有功功率极小,所以整个系统 中流动的无功功率相较有功功率可以近似忽略。据 此,忽略无功功率、电压相角、电抗得到实数方程,并 将式(1)全部取标幺值得到:

$$U = E + RP \tag{2}$$

式中:U为电压幅值向量;R为电阻矩阵;P为节点注 入有功功率向量。若无特别说明,则后文中所有电 压、电流、电阻、功率都默认为标幺值。值得注意的 是,式(1)实际上等同于配电网潮流的前推回代法第 一次迭代的计算结果,存在计算误差,误差来源是注 入功率和注入电流有如下关系(对于某一节点):

$$\hat{I} = \hat{S}^* \tag{3}$$

式中: Î 为某节点的注入电流(其为复数); Ŝ 为某节点 的注入复功率。更精确的关系应考虑节点的电压不 等于额定电压:

$$\hat{I} = \hat{S}^* / \hat{U}^*$$
 (4)

式中: *Û*为某节点的电压(其为复数)。类比式(4)推导式(2),则某节点注入电流、电压的表达式分别为:

$$I = P/U \tag{5}$$

$$U = E + RI \tag{6}$$

式中:I为某节点的注入电流幅值;P为某节点的注入有功功率;U为某节点的电压幅值;I为节点注入电流幅值向量。

1.2 基于泰勒展开的近似

式(5)、(6)所示的约束使潮流计算除复数量近 似外,不引入系统误差,但I、U都为变量,其引入了 分母为变量的分式,不为线性约束。考虑集电系统 内节点电压都在1~1.05 p.u.范围内,在这样小的变 化范围内可以对分式进行线性近似。在U=1 p.u.处 将分式做泰勒展开^[23]得:

$$I = P(2 - U) \tag{7}$$

利用该近似关系继续构建潮流约束。首先,风 电场中的风速及风向不定,共同构成了多个场景,计 算风机出力P在每个场景下的值并引入模型,最终 形成多场景的随机规划。由于尾流效应对风机出力 的影响是非常显著的^[24],为保证整体规划的精度,这 一因素必须考虑在模型中。利用式(7)构建场景*s* 下节点*i*的注入电流表达式为:

 $I_{i,s} = P_{i,s}^{wt} (2 - U_{i,s}) i \in N_w, s \in S$ (8) 式中:变量 $I_{i,s}$ 系数 $P_{i,s}^{wt}$ 和变量 $U_{i,s}$ 分别为场景s下节 点i的注入电流、节点i处风机的出力和节点i的电 压幅值; N_w 为风机节点集合;S为场景集合。

1.3 潮流约束构建及网损计算

集电系统规划模型中,网架结构不确定,式(6) 中的矩阵 R、I 都是由变量构成的矩阵,不能直接引 入模型。同样地,如果构建关联矩阵描述注入电 流与支路电流间的关系,则也会形成变量相乘的复 杂情况。

因此,利用连续非负变量*I_{i,j}*,描述场景*s*下节点*i*向节点*j*通过节点间的支路传输的电流,则根据基尔霍夫电流定律有:

$$\sum_{j \in N} I_{i,j,s} = P_{i,s}^{\text{wt}} (2 - U_{i,s}) + \sum_{a \in N_{\text{W}}} I_{a,i,s} \quad i \in N_{\text{W}}, s \in S \quad (9)$$

式中:N为风机节点集合与汇流站节点集合的并集。 设 $y_{i,j,t}$ 表示描述节点i,j之间是否存在型号为t的电缆的 0-1 变量, $y_{i,j,t}$ =1表示存在型号为t的电缆, $y_{i,j,t} = 0$ 表示不存在型号为t的电缆。根据式(6)采用 大M法建立考虑拓扑不确定的电压、电流关系如下: $U_{j,s} - M(1 - y_{i,j,t}) \le U_{i,s} - I_{i,j,t} d_{i,j} R_t \le U_{j,s} + M(1 - y_{i,j,t})$ $(i,j) \in B, t \in T, s \in S$ (10)

式中:M为一个极大的数; $d_{i,j}$ 为节点i,j间的距离; R_i 表示型号为t的电缆的单位长度电阻值;T为电缆型 号集合;集合B的定义如式(11)所示。

$$B = \left\{ (i,j) \left| i, j \in N \right. \right\}$$
(11)

对于式(10),若两节点间不存在型号为*t*的电缆,则约束被松弛;若存在,则变为一个等式约束。

潮流问题总会存在一个平衡节点,在集电系统中,潮流的平衡节点应为可以提供充足无功功率支 撑的汇流站节点。同时,为保证风机的安全运行,且 各节点电压应在1~1.05 p.u.范围内。用U_{1.3}(下标1 表示汇流站节点,后同)表示汇流站节点电压,增加 约束条件如下:

$$U_{1,s} = 1 \text{ p.u.} \quad s \in S \tag{12}$$

1 p.u. $\leq U_{i,s} \leq 1.05$ p.u. $i \in N_{W}, s \in S$ (13)

随后构建其他类型的支路约束。若节点*i、j*间 不存在支路,则不应存在支路电流。采用大M法构 建如下约束:

$$I_{i,j,s} \leq M \sum_{t \in T} y_{i,j,t} \quad (i,j) \in B, s \in S$$
(14)

另外,每条电缆的运行电流都存在固定的上限 值,构建电缆运行电流约束条件如下:

$$I_{i,j,s} \leq \sum_{t \in T} I_t y_{i,j,t} \quad (i,j) \in B, s \in S$$

$$(15)$$

式中:*I*_t表示型号为*t*的电缆的载流量。需要注意的 是,式(15)实际上包含了式(14)所示的约束。

至此,考虑拓扑不确定的新型潮流约束已经建 立完毕。需要指出的是,由于该潮流模型没有忽略 网损,实际计算网损时可以将汇集功率与所有风机 输出功率作差以计算网损。

2 集电系统可靠性数学约束化建模分析

海底电缆故障导致的系统停运电量损失也是总 成本中的重要组成部分。配置更多的断路器或减少 风机串的电缆长度都可实现故障损失的下降。为 此,本节考虑拓扑变量及开关配置变量建立了以数 学约束为具体形式的可靠性模型,基于故障功率流 构建了可靠性综合成本的计算表达式,并将可靠性 因素反映到集中优化模型中。该方法是可靠性理论 及评估逻辑的数学约束形式化,以优化模型的形式 完成较复杂的集电系统可靠性评估。

2.1 基于分块及网络流模型的可靠性建模

集电系统的故障损失计算需要对集电系统进行 可靠性评估。模拟法对于优化问题是一个黑箱模 型,且耗时较长,所以可采用的可靠性分析方法只能 为解析法。电缆的故障概率极小,对于项目全寿命 周期内网损成本的影响极小;且电缆故障时损失功 率远远大于网损功率。因此可采用故障场景与风速 风向场景(后文简称潮流场景)解耦的方式进行分 析。若考虑故障场景与潮流场景的叠加耦合,则将 大幅增加计算量和分析难度。

因此,本节提出故障场景与潮流场景解耦的分 析方法,即稳态潮流场景不考虑电缆故障,电缆故障 场景不考虑网损及风机出力波动。由于故障场景的 时间占比不超过5%,且可靠性计算中线路网损不 超过0.4%,场景解耦对于整体计算精度的影响可 以忽略。更重要的是,该方法减少了潮流场景及故 障场景的数量,大幅减少了模型中的变量、约束的 数量。

断路器可以隔断故障,减小故障损失,但是断路 器的配置同样需要一定的成本。为了实现系统总成 本的最优,本文令开关配置情况必须满足传统开关 配置要求并且可继续灵活新增,从而建立开关配置 的优化模型。在配电网中,断路器应配置在潮流上 游,即线路更靠近母线的一侧(简称末端)。在集电 系统中由于潮流方向和配电网相反,断路器应起到 保护风机正常并网的功能,同样应配置在线路更靠 近母线的一侧。此时断路器恰好在潮流下游。由于 风机出口存在断路器,所以线路两端并不需要完全 配置2台断路器。故障的功率损失期望可以基于电 缆流过的平均功率进行描述。利用网络流模型建立 用于可靠性分析的潮流约束如下:

$$\sum_{i\in\mathbb{N}} P_{i,j} = P_i^{\text{wt}} + \sum_{a\in\mathbb{N}_{\text{w}}} P_{a,i} \quad i\in\mathbb{N}_{\text{w}}$$
(16)

$$P_{i,j} \leq M \sum_{t \in T} \gamma_{i,j,t} \quad (i,j) \in B$$

$$(17)$$

式中:*P_{i,j}*为无故障时节点*i*,*j*间传输的平均功率;*P*^{wi}_i为节点*i*处风机的平均出力。

基于配电网可靠性评估理论,集电系统可仅考虑一阶事件,电缆的故障频率可以用故障率近似描述。放射状拓扑中功率的流通是单向的,根据此性质,每个节点汇集功率后仅通过一条支路输出。设 b_i为描述节点*i*的出线末端是否存在断路器的0-1变量,*b_i*=1表示存在断路器,*b_i*=0表示不存在断路器。 集电系统分块示例如图1所示,图中WT表示风机。 根据断路器将集电系统分块^[25],计算每块停运事件的频率,再乘以该块停运导致的总功率损失(即分块





出口处流出的功率)及故障时间,可得到集电系统故 障总电量损失,这是最直观的方法。类比式(16)的 网络流模型,结合大M法,可构建模型如下:

$$\sum_{j \in N} \lambda_{i,j} = \lambda_0 \sum_{j \in N} \sum_{t \in T} \gamma_{i,j,t} d_{i,j} + \sum_{a \in N_{w}} \lambda'_{a,i} \quad i \in N_{w} \quad (18)$$

$$\lambda_{i,j} - Mb_i \leq \lambda'_{i,j} \leq \lambda_{i,j} + Mb_i \quad (i,j) \in A$$
(19)

$$\lambda_{i,j}^{\prime} \leq M(1-b_i) \quad (i,j) \in A \tag{20}$$

$$\lambda_{i,j}, \lambda'_{i,j}, P'_{i,j} \leq M \sum_{t \in T} \gamma_{i,j,t} \quad (i,j) \in B$$
(21)

$$P'_{i,j} - M(1 - b_i) \leq P_{i,j} \leq P'_{i,j} + M(1 - b_i) \quad (i,j) \in A$$
 (22)

$$P'_{i,j} \leq Mb_i \quad (i,j) \in A \tag{23}$$
$$\sum v_{i,j} \leq b_i \quad i \in N_{\pi} \tag{24}$$

$$W = T_{\text{MTTR}} \sum_{i \in N_{\text{w}}} \left(\sum_{j \in N} P'_{i,j} \sum_{j \in N} \lambda_{i,j} \right)$$
(25)

式中: $A = \{(i,j) | i \in N_W, j \in N \}; \lambda_{i,j}$ 为节点i, j间的故障 流,表示故障率在分块中的汇集效应; λ_0 为电缆单位 长度故障率,其为常数; $\lambda'_{i,j}$ 为节点i, j间的传导故障 流,若电缆无断路器,则其值等于故障流,若电缆具备 断路器,则其值为0; $P'_{i,j}$ 为节点i, j间的虚拟功率流, 仅在分块出口处有取值,表示出口处流出的功率; T_{MTTR} 为电缆平均故障修复时间;W为年故障损失电量 期望。式(24)确保系统满足最基本开关配置要求。

故障流、传导故障流与虚拟功率流都是网络流 变量。这些变量及相关的约束实现了可靠性分析中 的逻辑推理及计算过程,使得本文提出的集中式拓 扑及开关优化成为可能。故障流、传导故障流的单 位都为次/a。传导故障流描述了断路器隔离故障 的逻辑,即故障不会影响到断路器处的潮流下游。 该变量使得故障率顺着潮流方向汇集叠加得到故障 流,且遇到断路器会停止汇集。因此,整个分块的故 障率之和即为分块出口处电缆的故障流。虚拟功率 流描述了分块故障导致的停运功率,即分块出口处 电缆流过的平均功率,单位为MW。由于故障损失 仅需计算分块出口处的功率与故障流之积,为了区 分出口处线路和普通线路,可令普通线路的虚拟功 率流为0。该变量实现了对于线路是否处于分块出 口处的逻辑判断。

上述分析建立了故障流模型和虚拟功率流模型,对可靠性问题及开关优化问题进行了详细的评估,但是最终功率损失表达式仍是变量相乘的形式。如果将该项引入目标函数,则构成二次规划模型0.5x^TQx+c^Tx(x为模型决策变量,c为二次规划模型中含决策变量一次项的系数矩阵),其系数矩阵Q 不定,固定或松弛所有整数变量后下层问题仍非凸, 无法求解。因此,需要对上述方法进行进一步改进。 2.2 基于故障功率流的线性化方法

上述建模过程说明了不能采用故障流与虚拟功

率流相乘的方法,需要采用另外的建模方式,将原模型故障流变量与虚拟功率流相乘的方式改为线性表达式,并只能利用一个变量表示故障所带来的功率损失。虚拟功率只能利用变量表示,不能修改,但是分块出口处的故障流可以表示为分块内各电缆故障率之和。可使虚拟功率流变量修改为与分块出口处的功率等值,并将分块内每段电缆的故障率与虚拟功率流相乘,得到一个新的流变量,利用此流变量表示功率损失在馈线中的流通和叠加,因而不妨将此流变量定义为故障功率流。

修改后的虚拟功率流在分块内具有相同的值, 需要根据节点间相连情况和断路器情况构建虚拟功 率流的等式约束。使用大M法构建所有流变量的网 络流约束,最后得到故障功率流模型如下:

$$\sum_{j \in N} P_{i,j} - M(1 - b_i) \leq P'_i \leq \sum_{j \in N} P_{i,j} + M(1 - b_i) \quad i \in N_{W} \quad (26)$$
$$P'_j - M \left(1 - \sum_{t \in T} y_{i,j,t} + b_i \right) \leq P'_i \leq P'_j + M \left(1 - \sum_{t \in T} y_{i,j,t} + b_i \right)$$
$$(i,j) \in A \quad (27)$$

$$P_{i}^{\prime}\lambda_{0}d_{i,j} - M\left(1 - \sum_{t \in T} y_{i,j,t}\right) \leq \sum_{a \in N} P_{i,a}^{*} - \sum_{j \in N_{w}} P_{j,i}^{*} \leq P_{i}^{\prime}\lambda_{0}d_{i,j} + M\left(1 - \sum_{t \in T} y_{i,j,t}\right) \quad (i,j) \in A \quad (28)$$

$$P_{i,j}^{\mathsf{w}} \leq M \sum_{t \in T} \gamma_{i,j,t} \quad (i,j) \in B$$

$$(29)$$

$$\begin{cases} \sum_{j \in N} P_{i,j} = P_i^{wt} + \sum_{a \in N_w} P_{a,i} \quad i \in N_w \\ P_{i,j} \leq M \sum_{t \in T} y_{i,j,t} \quad (i,j) \in B \\ \sum_{i \in T} y_{i,1,i} \leq b_i \quad i \in N_w \end{cases}$$
(30)

式中:P_i为修改后的节点i出线的虚拟功率流;P_i为 节点i、j间的故障功率流。此时,考虑开关最优配 置的拓扑规划模型仍为MILP模型,可采用求解器全 局寻优,具有较高的求解效率。

3 集电系统 MILP 模型

除潮流约束、可靠性模型约束外,集电系统规划 模型还存在其他的若干约束。首先,本文认为集电 系统采用放射状拓扑,根据放射状拓扑的结构特点, 引入拓扑约束如下:

$$\sum_{j \in N} \sum_{t \in T} \mathcal{Y}_{i,j,t} = 1 \quad i \in N_{\mathrm{W}}$$

$$(31)$$

该约束将拓扑限制为放射状。同时,由于海底 电缆安装在海底沟渠内,不允许交叉,规划模型应引 入交叉约束如下:

$$\sum_{i \in T} y_{i,j,i} + \sum_{i \in T} y_{a,f,i} \leq 1 \quad (i,j,a,f) \in X$$
(32)

式中:X为交叉集合,通过枚举法计算得到^[8,14]。

集电系统全寿命周期成本包括电缆成本、断路

100

器成本、网损成本、故障损失成本。利用等效现值来 刻画全寿命周期成本,定义年值-现值转换系数A₀为:

$$A_0 = \frac{1 - (1 + r)^{-T_0}}{r}$$
(33)

式中:r为折现率;T₀为项目周期。根据上述潮流模型及可靠性模型,构建集电系统 MILP 模型如下:

$$\min C = \sum_{i \in N_{w}} \sum_{j \in N} \sum_{t \in T} d_{i,j} y_{i,j,t} c_{t} + \sum_{i \in N_{w}} b_{i} c_{brk} + 8 \ 760 A_{0} c_{e} P_{N} \left(P_{sum} - \sum_{i \in N_{w}} \sum_{s \in S} p_{s} I_{i,1,s} \right) + A_{0} c_{e} T_{MTTR} P_{N} \sum_{i \in N_{v}} P_{i,1}^{w}$$
(34)

式中:C为总成本; c_t 表示型号为t的电缆单位长度的购置安装费; c_{bk} 为断路器的购置安装费; c_{o} 为上网电价; P_N 为风机额定出力; P_{sum} 为风机平均出力之和; p_s 为场景s发生的概率。式(34)等号右侧各项依次为电缆成本、断路器成本、网损成本和停运损失成本。

本文模型约束为式(9)、(10)、(12)—(15)、 (26)—(32)。由于潮流模型的改进,式(34)可将风 机出力与汇集功率作差得到网损,建立的目标函数 形式更加简洁,更利于求解。该优化问题具有集中 式架构,综合考虑投资、网损、可靠性等成本,建立了 各决策变量与各类成本间的耦合关系,得出的拓扑 方案具备最优的经济性。

4 算例分析

4.1 算例概况

本文采用文献[13]中的英国BOWF风电场作为 算例系统进行分析。该风电场于2006年已建成,考 虑到目前新建的海上风电场规模更大,机组容量更 大,将该风电场容量扩大1倍作为本文算例,见附录 A图A1。

算例风电场采用金风 GW184-6.45 MW 风力发 电机组,额定功率为6.45 MW。尾流模型采用 Jensen 模型^[24],推力系数采用文献[24]中的实验结果。提 取主要风速方向8个,主要风速强度5个,构建40个 风速场景。风机输出模型采用文献[7]中的线性模 型,并采用文献[7]中的角度聚类算法进行风机节点 的聚类。由于截面最大的电缆仅可以承载6台风机 的满额出力,将聚类数设定为5组较为合适。电缆 参数^[9]、风机参数、可靠性参数、风速场景^[7]、项目参 数的数据分别见附录A表A1—A5。根据 BOWF风 电场的实际工程设计,集电系统电压取33 kV。

4.2 算例求解

采用文献[13]的经典 MIQP 模型(后文简称对 照模型)与本文模型进行对比。对照模型采用了传 输模型计算潮流,采取开关完全配置方式,未考虑尾 流效应。为保证可比性,将交叉约束、场景解耦方法 和聚类算法引入对照模型。将风机节点进行聚类, 分解为5个子问题后,分别采用文本模型与对照模 型进行程序编写与优化计算。通过聚类程序得到的 风机节点聚类结果见附录A图A2。

两程序均采用 Python3.6.2 调用 Gurobi9.0.3 编写,调用的算法为分支定界法。计算机配置如下: CPU为i5-10400,主频为2.9 GHz,内存为16 GB。

4.3 求解结果对比

两程序均在3000s内完成计算,结果如图2所示。统计两模型计算结果,汇总5个聚类组的电缆成本、网损成本及故障损失成本,并将断路器成本计入故障损失成本综合得到可靠性成本,如表1和表2所示。



图2 两模型开关配置结果对比

Fig.2 Comparison of switch allocation results between two models

表1 对照模型各组的成本

Table 1 Group costs of comparison model 单位:万元

组别	电缆成本	网损成本	可靠性成本	总成本
对照组1	332.46	278.71	310.89	922.07
对照组 2	589.60	441.46	493.00	1 524.06
对照组 3	147.84	81.44	117.59	346.88
对照组 4	258.48	256.34	261.56	776.38
对照组 5	551.85	458.24	498.09	1508.18
总和	1880.23	1516.19	1681.13	5077.57

表2 本文模型各组的成本

Table 2 Group costs of proposed model

			4	<u>чи:лл</u>
组别	电缆成本	网损成本	可靠性成本	总成本
本文组1	283.21	255.65	255.32	794.18
本文组 2	458.35	285.26	292.51	1036.12
本文组 3	147.84	53.39	93.97	295.20
本文组 4	258.48	121.26	172.06	551.80
本文组 5	551.85	237.10	315.66	1 104.61
总和	1 699.73	952.66	1 1 2 9 . 5 2	3781.91

由上述结果可知,本文模型的各组总成本都显 著低于对照模型的计算结果。对于总成本,本文模 型相较于对照模型减少了25.5%。两模型在电缆成 本上的差距较小,但对于网损成本,本文模型明显小 于对照模型,其原因是对照模型的计算忽略了尾流 效应,导致网损计算结果偏大。可靠性成本是本文 方法优化的重点。本文方法没有采用在所有电缆末 端配置断路器的完全开关配置方法,而是保证断路 器发挥较大经济效益进行优化配置,所以其可靠性 成本明显低于对照模型,较之降低了32.8%。若在 该拓扑中采用断路器完全配置方案,则可靠性成本 将增加17.13万元,可靠度仅提升了0.03%。

4.4 潮流模型对比

由于2个模型都对潮流进行了一定的近似,利 用前推回代法计算两模型各场景下的潮流。前推回 代计算的精度为电压误差小于0.0001%。将风向为 南风且风速为17m/s作为典型风速场景,评估两 模型的潮流计算精度。该典型场景中风机尾流仅影 响正北3km的单台风机,且风速较大,风电场风机 全部满发,适合两模型的潮流计算对比。此场景下 两模型的精确潮流结果分别见附录A图A3(a)、 (b)。所有节点的电压幅值都非常接近系统额定 值,最大偏差不足1%。此外,各支路的功率因数都 在0.9998以上,各节点电压的相角都在1.05°以内。 上述潮流特性证明了本文潮流近似模型前提假设的 合理性。

在此典型场景下,根据两模型的潮流计算方法 计算潮流,并与实际潮流情况进行对比,结果如图3 所示。

根据误差计算结果可得到的对照模型由于采用 了传输模型,支路网损误差最大可达到1.2%,而本 文模型的支路网损误差最大仅为0.036%。在网损 计算方面,本文模型的精度相较对照模型有了显著 的提高。虽然支路功率和节点电压不是优化模型所 关心的,但是采用本文模型时该两项的最大误差同 样极小,分别为0.006%和0.013%,而对照模型的最 大误差分别达到了0.2%和0.6%。



4.5 标准成本分析对比

表1和表2中的成本是通过存在潮流近似的优 化模型计算得到的,因此将表1和表2的成本结果定 义为计算成本,由于存在各类误差,所以利用其对模 型优劣进行评价说服力不足。为对模型进行正确的 评估,利用精确潮流结果计算得到标准成本,并利用 标准成本进行模型间的比较。进一步地,由于不同 模型的潮流分析、可靠性分析、求解架构存在差异, 所以最终得到的优化结果很可能不为最优解,本文 根据标准成本定量描述各模型及方法的优劣。标准 成本的结果及对比如表3所示。

表3 标准成本对比

Table 3 Comparison of standard cost

模型	标准成本 / 万元	较本文模型差距 / %
对照模型	4371.00	15.67
两阶段优化模型	4027.36	6.58
本文模型	3778.80	—

由表3可以看出,由于考虑了开关优化且采用 了更精确的潮流模型,本文模型的标准成本最低。 并且,采用本文模型得到的计算成本与标准成本差 异极小,误差仅为0.08%。对照模型的标准成本比 本文模型高了15.67%。对照模型由于在潮流模型 中忽略了网损,其给出的网损计算结果相对真实值 存在明显的误差,达到了16.16%。综合标准成本与 计算成本的对比结果可以看出进行标准成本分析是 非常必要的。

对网损计算误差展开进一步分析,本文模型的

网损计算误差为 0.3%, 但根据上文结果, 典型场景 下各支路的网损计算误差都不足 0.05%。出现较大 网损计算误差的原因是式(7)与式(34)。式(34)中 网损等于风机出力与汇集功率之差, 引入了式(7)中 的计算误差。式(7)中, 泰勒展开所带来的误差被式 (34)视作网损, 虽然式(7)的近似中电压和电流都非 常接近 1 p.u., 但是乘以的系数 P 是风机出力, 比网 损高 3 个数量级, 引入的误差相对于网损较大。采 用支路电流平方与电阻之积的方法计算网损并保留 式(9)实现考虑网损的潮流线性化(称之为本文模型 的 *F R* 改进形式), 计算结果证明网损误差将减小至 更加精确的 0.011%。考虑尾流效应的对照模型网 损成本计算误差为 7.57%, 相比之下本文模型采用 式(34)的方法仍具有明显优势。限于篇幅, 本文不 再继续赘述模型的改进和相应的算例计算结果。

综合上述分析,本文提出的潮流模型的网损计 算误差可达到10⁻⁴的数量级,具有很理想的精度,相 比传输模型具有显著的优势。若采用考虑无功功率 的线性潮流模型,则网损计算会更加精确。但考虑 到集电系统规划问题的复杂度,本文MILP模型及其 *PR*改进形式分别具有0.3%和0.01%的网损计算精 度已经足够精确,较现有研究提升显著;且忽略无功 的形式减少了大量的约束和变量,可提高求解速度。 因此,本文提出的线性潮流模型更适用于求解集电 系统拓扑规划问题。

对照模型仅考虑了开关完全配置,同样可以采 用两阶段优化的方法,第一阶段仅考虑开关完全配 置,形成拓扑和电缆选型方案;第二阶段根据已有拓 扑进行开关优化配置。由表3可知,采用该两阶段 优化模型优化上述对照模型的方案,可靠性成本下 降了343.64万元,得到标准成本为4027.36万元,但 仍比本文方案高了6.58%。即使对照模型采用了考 虑开关优化配置的两阶段优化,得到的标准成本仍 然高于本文方法,这说明了本文集中式优化方法的 优势较大。

4.6 较工程方案的提升

根据 BOWF 风电场实际设计^[13]构建对比方案, 见附录 A 图 A4。该工程设计采用了简单的链形划 分和设计。风电场共有 4 条风机串,每串风机数量 为7台或 8台;开关配置方式采用了完全配置方式。 此方案的电缆参数见附录 A 表 A6。该方案的成本 计算结果如表 4 所示。可见采用本文模型得到的方 案较原工程方案减少了 781.33 万元的总标准成本, 减少占比达到了 17.1%,优化效果显著。

原工程方案由于简单地将成排的风机聚为一 串,使得距离汇流站较远的接线构成了直角,明显增 加了电缆长度。由表4和表A6可知,原工程方案虽

表4 本文方案与原风电场方案的对比

Table 4 Comparison between proposed scheme and

original wind farm scheme

				单位:万元
方案	电缆成本	网损成本	可靠性成本	总标准成本
原风电场 方案	1 535.78	1 605.69	1418.66	4560.13
本文方案	1 699.74	949.54	1 1 29.52	3778.80

然采用了更大容量、更经济的电缆,但是其电缆成本 仍与本文方案较为接近。电缆长度较长也带来了更 为严重的网损和可靠性问题,相比本文方案,原方案 网损成本增加了69.1%,可靠性成本增加了25.6%。

显而易见,工程设计中将成排风机简单串联得 到的设计方案不具备最优性,考虑整体综合成本的 优化规划是十分必要的。

5 结论

1)本文提出了一种适用于集电系统规划问题的 含网损线性潮流模型,并结合电缆的0-1变量构建 了优化模型的潮流约束。该方法使优化模型的网损 计算线性化,误差较传输模型明显降低,并具有误差 精确至0.01%的潜力。该线性潮流模型的假设满足 集电系统的运行特性,兼顾精度和效率,相对于传统 的传输模型优势显著。

2)本文考虑拓扑变量及开关变量,将开关成本 与故障损失同时引入优化模型。基于可靠性评估理 论及分析逻辑,建立了故障功率流等变量及相应的 约束,实现了集电系统可靠性的数学约束化分析建 模。考虑开关优化配置将使得总成本实现进一步的 降低。

3)现有模型对于实际问题在潮流计算上存在近 似,其计算成本与方案的标准成本存在较大出入,利 用所提标准成本概念评判方案的优劣更具说服力, 同时可以定量反映各模型的寻优能力。

4)相较于已有研究,本文方法可以得到标准成本显著降低的更优解。同时,将本文方法应用于现 有案例系统,所得方案的经济性显著优于实际工程 设计。

综上所述,本文提出的潮流及可靠性线性化分析、场景解耦、标准成本分析,对于集电系统规划问题的建模和求解提出了新的思路,相较现有研究具有一定的提升。但是,本文只考虑了放射形拓扑,考虑环形拓扑等更灵活的拓扑规划模型将在后续的研究工作中展开。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1]国家统计局.中华人民共和国2021年国民经济和社会发展统

计公报[EB/OL]. (2021-02-28)[2022-08-14]. http://www. stats.gov.cn / tjsj / zxfb / 202202 / t20220227_1827960.html.

- [2] GWEC. Global wind report 2022[R]. Brussels, Belgium: GWEC, 2021.
- [3] 江岳文,张金辉.考虑风电接纳水平及负荷增长的海上风电场 多阶段规划[J].电力自动化设备,2022,42(2):85-91,111.
 JIANG Yuewen, ZHANG Jinhui. Multi-stage planning of offshore wind farm considering wind power accommodation level and load increase[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022,42(2):85-91,111.
- [4] 陈宁.大型海上风电场集电系统优化研究[D].上海:上海电力学院,2011.
 CHEN Ning. Large-scale offshore wind farm electrical collec-

tion systems optimization [D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2011.

- [5] 符杨,徐涵璐,黄玲玲.海上风电场集电系统全寿命周期成本 分析[J].电力系统自动化,2016,40(21):161-167.
 FU Yang, XU Hanlu, HUANG Lingling. Life-cycle cost analysis of power collection system in offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(21):161-167.
- [6] WANG L, WU J, WANG T, et al. An optimization method based on random fork tree coding for the electrical networks of offshore wind farms[J]. Renewable Energy, 2020, 147:1340-1351.
- [7] SHIN J, KIM J. Optimal design for offshore wind farm considering inner grid layout and offshore substation location [J].
 IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3):2041-2048.
- [8] PÉREZ-RÚA J A, CUTULULIS N A. Electrical cable optimization in offshore wind farms-a review[J]. IEEE Access, 2019, 7:85796-85811.
- [9] WEDZIK A, SIEWIERSKI T, SZYPOWSKI M. A new method for simultaneous optimizing of wind farm's network layout and cable cross-sections by MILP optimization[J]. Applied Energy, 2016,182:525-538.
- [10] CERVEIRA A, DE SOUSA A, SOLTEIRO PIRES E J, et al. Optimal cable design of wind farms: the infrastructure and losses cost minimization case [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6):4319-4329.
- [11] PÉREZ-RÚA J, STOLPE M, CUTULULIS N A. Integrated global optimization model for electrical cables in offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11 (3):1965-1974.
- [12] PÉREZ-RÚA J, STOLPE M, DAS K, et al. Global optimization of offshore wind farm collection systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3):2256-2267.
- [13] BANZO M, RAMOS A. Stochastic optimization model for electric power system planning of offshore wind farms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3):1338-1348.
- [14] JIN R, HOU P, YANG G, et al. Cable routing optimization for offshore wind power plants via wind scenarios considering power loss cost model[J]. Applied Energy, 2019, 254:113719.
- [15] 黄玲玲,曹家麟,张开华,等.海上风电机组运行维护现状研究 与展望[J].中国电机工程学报,2016,36(3):729-738.
 HUANG Lingling, CAO Jialin, ZHANG Kaihua, et al. Status and prospects on operation and maintenance of offshore wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(3):729-738.
- [16] 符杨,黄路遥,刘璐洁,等. 基于状态自适应评估的海上风电机 组预防性维护策略[J]. 电力自动化设备,2022,42(1):1-9.
 FU Yang,HUANG Luyao,LIU Lujie,et al. Preventive maintenance strategy for offshore wind turbine based on state adaptive assessment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022,42(1):1-9.

- [17] 符杨,苗育植,黄玲玲,等.基于改进贝叶斯网络的风电机组动态可靠性评估[J].电力自动化设备,2022,42(11):32-39.
 FU Yang,MIAO Yuzhi,HUANG Lingling, et al. Dynamic reliability evaluation of wind turbine based on improved Bayesian network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42 (11):32-39.
- [18] 谭任深,杨苹,贺鹏,等.考虑电气故障和开关配置方案的海上风电场集电系统可靠性及灵敏度研究[J].电网技术,2013,37
 (8):2264-2270.
 TAN Renshen,YANG Ping,HE Peng, et al. Analysis on reliability and sensitivity of collection system of offshore wind farms considering electrical faults and switchgear configura-
- tions[J]. Power System Technology,2013,37(8):2264-2270. [19] 王建东,李国杰.考虑电缆故障时海上风电场电气系统开关 配置方案的经济性比较与分析[J].电网技术,2010,34(2): 125-128.

WANG Jiandong, LI Guojie. Economic study on switchgear configuration in electrical systems of offshore wind farms with cable outage[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 125-128.

- [20] 孙磊,杨贺钧,丁明. 配电系统开关优化配置的混合整数线性 规划模型[J]. 电力系统自动化,2018,42(16):87-95.
 SUN Lei,YANG Hejun,DING Ming. Mixed integer linear programming model of optimal placement for switching devices in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(16):87-95.
- [21] 黎静华,王治邦,姜娟. 计及供能可靠性的电-气互联传输网络 优化规划[J]. 电力自动化设备,2021,41(9):164-172,247.
 LI Jinghua, WANG Zhibang, JIANG Juan. Optimal planning of integrated electricity-gas transmission network considering energy supply reliability[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(9):164-172,247.
- [22] BOLOGNANI S, ZAMPIERI S. On the existence and linear approximation of the power flow solution in power distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016,31(1):163-172.
- [23] MONTOYA O D, GRISALES-NOREA L F, GONZÁLEZ-MONTOYA D, et al. Linear power flow formulation for lowvoltage DC power grids[J]. Electric Power Systems Research, 2018,163:375-381.
- [24] SERRANO G J, BURGOS P M, SANTOS J M R, et al. A review and recent developments in the optimal wind-turbine micro-siting problem [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 30:133-144.
- [25] 周念成,谢开贵,周家启,等.基于最短路的复杂配电网可靠性 评估分块算法[J].电力系统自动化,2005,29(22):39-44. ZHOU Niancheng, XIE Kaigui, ZHOU Jiaqi, et al. Reliability evaluation of large scale distribution system using the shortest path algorithm and section technique[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(22):39-44.

作者简介:



王邦彦(1998—),男,博士研究生,通信 作者,研究方向为电力系统规划、电力系统可 靠性(E-mail:3120104101@stu.xjtu.edu.cn); 王秀丽(1961—),女,教授,博士研究生 导师,主要研究方向为电力系统规划、电力市 场、电力系统可靠性、新型输电方式(E-mail: xiuliw@mail.xjtu.edu.cn)。

王邦彦

WANG Bangyan¹, WANG Xiuli¹, SHUAI Xuanyue¹, WANG Yifei¹, WANG Shuai², XIN Chaoshan³

(1. School of Electrical Engineering(Shaanxi Key Laboratory on Smart Grid),

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

3. Economic and Technological Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830047, China) Abstract: Offshore wind power is an important support for the new power system. Its collector system requires a large number of expensive submarine cables, accounting for a higher proportion of the total cost, and it is more difficult to be optimal planned. For this reason, a loss-contained linear power flow model suitable for collector system is proposed, and the power flow constraints are constructed based on decision variables. Considering the optimization of switch configuration, the reliability comprehensive cost is introduced into the model, and the scene is decoupled, the outage power flow variable is constructed based on the network flow model to achieve the modeling and analysis of mathematical constraint form of reliability. The planning model of collector system is built by integrating the costs of various aspects. After clustering the wind turbines, the centralized optimization is performed to obtain the optimal grid topology. At the same time, the concept of standard cost is put forward to comprehensively judge the planning scheme and solution model. Finally, the comparison of the case study between the existing method and the proposed method shows that the solution obtained by the proposed method has a lower standard cost and the proposed model has better calculation accuracy. In summary, the proposed model and method are more suitable for the planning analysis problem of the collector system.

Key words: offshore wind power farms; collector system; linear power flow; topology optimization; reliability analysis

(上接第77页 continued from page 77)

Collaborative optimization strategy of source-grid-load-energy storage based on improved Nash-Q equilibrium transfer algorithm

HUANG Hui¹, LI Yonggang¹, LIU Huazhi²

Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
 State Grid Tianjin Electric Power Research Institute, Tianjin 300220, China)

Abstract: In order to give full play to the scheduling potential of multi-type energy storage resources and realize the collaborative optimization scheduling of source-grid-load-energy storage, a multi-type energy storage scheduling strategy including battery energy storage, pumped storage and electric vehicles is proposed. With the goal of low-carbon economy, the collaborative optimization scheduling model of source-grid-load-energy storage considering multi-agent game is established. In order to ensure the overall interests of source side, grid side and load side while taking into account their own interests, based on Nash equilibrium theory and using the reinforcement transfer learning technology, an equilibrium transfer algorithm based on improved Nash-Q is proposed. *K*-means clustering is used to discretize the data, and a dual-structure experience pool is added to improve the sample utilization rate, thus effectively improving the generalization ability of the model. Based on the data of an actual regional power grid, the simulative results show that the proposed strategy can effectively reduce the economic cost and carbon treatment cost of the system, and improve the new energy consumption capacity.

Key words: source-grid-load-energy storage collaboration; multi-type energy storage; multi-agent game; Nash equilibrium; new energy consumption; collaborative scheduling



图 A1 鼻例风电场风机分布 Fig.A1 Wind turbine layout of test case wind farm

表	A1	电缆参数
Table A1	Pat	rameters of cables

	1	able Al Tal	ameters of cabi	.es	
파네 디	购置安装成本/	载	₹流量/	电阻/	电抗/
型亏	(万元 km ⁻¹)	А		$(\Omega \cdot \mathrm{km}^{-1})$	$(\Omega \cdot km^{-1})$
1	22.183	320		0.196	0.126
2	45.425		750	0.037	0.097
		表 A2	风机参数		
	Table	e A2 Parame	ters of wind tu	rbines	
貓宁山亥AAW	切入风速/	额定风速/	切出风速/	主人/。	叶轮
 彻定功率/1 11	(m s ⁻¹)	(m s ⁻¹)	(m s ⁻¹)	→ 山/a	直径/n
6.45	3	10	21	25	184
		表 A3 译	可靠性参数		
	Tal	ble A3 Paran	neters of reliab	ility	
	海底电缆故障率/	断路	器购置安装	平均故障修复	
	(次 a ⁻¹ km ⁻¹)	成本/万元		时间/h	
0.003125		12.25 1 440		1 440	
		表 A4 风	速场景参数		
	Table	A4 Paramet	ers of wind sce	enarios	
	风速大小/(m	s ⁻¹)		场景概率	
	1.5			0.16	
	5			0.34	
	8.5			0.31	
	13			0.17	
	17			0.02	
	风向			场景概率	
	东			0.04	
	东北			0.13	
	北			0.04	
	西北			0.02	
	西			0.1	
	西南			0.24	
	南			0.25	
	东南			0.18	



表 A5 项目参数 Table A5 Parameters of project



	Table A6 Supplementar	y parameters of ca	bles
刑旦	购置安装成本/	载流量/	电阻/
型亏	(万元 km ⁻¹)	А	$(\Omega \cdot km^{-1})$
Ι	32.750	605	0.059
П	58.965	915	0.027

表 A6 补充电缆参数 Table A6 Supplementary parameters of cables

注: 根据文献[9]数据拟合得到。