第49卷 第10期 2025年5月25日
DOI：10.7500/AEPS20240409003
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 49 No. 10 May 25，2025

基于电网演化模型的新型输电网测试系统生成方法

黎 博[1,2]，魏光瑞[1]，钟海旺[2]，刘 辉[1]
（1. 广西大学电气工程学院，广西壮族自治区南宁市 530004；
2. 清华大学电机工程与应用电子技术系，北京市 100084）

摘要： IEEE算例已被广泛用于电力系统规划、运行等领域的仿真测试。然而，受限于数据隐私保护，研究人员难以获取实际电力系统发电与网架结构的公开数据集。为此，提出一种基于三代电网演化模型的新型输电网测试系统生成方法，构建反映实际电力系统特征的输电网测试算例。首先，建立基于$N-1$安全校核的输电网扩展规划模型。然后，针对电网不同发展阶段特征设置相应优化目标与约束条件，以模拟电网的演化历程。为提高模型求解效率，建立输电走廊待建线路的二进制表征方法，以减少模型0-1变量。最后，以某省电网为例，构建开源电力测试系统，并根据复杂网络的统计特性验证所构建算例的有效性。此外，将该算例应用于输电网结构优化中以验证算例的合理性。

关键词： 输电网；扩展规划模型；测试系统；$N-1$安全约束；电网演化模型

0 引言

高比例可再生能源逐渐成为未来电力系统的主要特征之一，大规模可再生能源的高效利用将是新型电力系统的主要发展方向[1]。风、光等间歇性能源的随机性和不确定性将逐渐改变电力系统的形态与结构[2]。然而，传统测试算例较为陈旧，网架结构和机组信息难以反映未来电力系统的形态与结构[3-4]。为此，亟须构建含高比例可再生能源的新型电力系统测试算例，用于电网规划、运行等研究领域的仿真测试[5-6]。

目前，主要有以下4种新型电力系统测试算例构建方法。

1）基于专家经验的构建方法：文献[7]改进了IEEE-RTS系统，增加风光机组与时序数据。文献[8]基于中国西北750 kV电网2030年规划方案，构建了含8 760 h时序数据的HRP-38系统。文献[9]对HRP-38测试系统进行改进，构建了HRPTD-20测试系统。这种测试系统的构建通常基于真实电网数据，经相关领域的专家校验，行业认可度高。然而，此类测试系统受限于数据保密性，需要进行网架简化与数据脱敏，可能导致算例参数不完整。

2）基于图论的网架生成方法。文献[10]提出基于小世界网络的建模方法。但小世界网络特征只与高压电网拓扑匹配[11-12]。文献[13]基于复杂网络特性对北欧输电网的电网脆弱性进行分析。文献[14]提出一种基于度分布的拓扑生成模型。然而，该类方法没有考虑到地理位置和电气特性的影响。

3）基于网架特征的合成网络方法。考虑到网架的构建受地形、经济等多种外部因素的影响。文献[15]提出一种结合Alpha稳定分布和广义加性模型的混合模型。文献[16]提出一种基于最小生成树算法的拓扑生成模型，拓扑特性符合真实电力系统。文献[17-18]基于公共数据，提出考虑真实地理信息的网架构建方法。文献[19-22]基于美国得克萨斯州与纽约州等公开数据建立高精度算例。然而，上述方法并未考虑网架结构的形成是一个多阶段演化的结果。

4）基于节点度的演化方法。文献[23]在合成网络的基础上考虑经济因素对电网历史演变的影响，基于各节点的节点度构造演化模型。然而这种方法需要精确数据，故无法提供开源测试集。

考虑到现有的算例构建对象主要为美国、欧洲等，而计及中国电力系统数据的保密性，亟须提出一种适用于中国电力系统且反映网架结构及新能源发电特征的合成网络构建方法。为此，本文基于三代电网演化模型，提出一种新型输电网测试系统生成方法。首先，依据公开信息通过演化模型构建网架

收稿日期：2024-04-09；修回日期：2024-10-23。
上网日期：2025-03-06。
广西科技基地和人才专项资助项目（2022AC21257）；国家自然科学基金资助项目（52122706）。

拓扑结构。然后，基于三代电网理念，对某省输电网进行输电网网架结构演化，构建了220 kV新型输电网测试系统。最后，基于复杂网络理论验证所提方法的有效性和测试系统的合理性，并进行输电网结构优化的基准规划方案测试。

1 输电网扩展规划模型

输电网方案设计原则要求输电网规划在满足安全可靠、运行灵活的基础上，最小化电网建设和运行成本[24]。因此，本文将输电网扩展规划的最优解视作电力系统网架结构各阶段的演化结果，通过输电网扩展规划模型合理地新建输电线路，以满足负荷需求、$N-1$校核等约束条件，并使规划方案的总成本最小，以构建一个高度还原的开源电力测试系统。

1.1 目标函数

输电网扩展规划模型的目标函数为系统总成本C最小，包括线路投资成本C_1、运行成本C_2、风光弃电惩罚成本C_3和切负荷惩罚成本C_4[25]，有

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \tag{1}$$

线路投资成本表示为：

$$C_1 = \sum_{(i,j)\in\Omega_L}\sum_{k=1}^{\omega}\beta c_{ij,y,k}2^{k-1}x_{ij,k} \tag{2}$$

式中：ω为一条输电走廊内可建线路数量；Ω_L为待扩建候选线路集；β为资本回收系数，$\beta = z(1+z)^d/[(1+z)^d-1]$，其中，$d$为线路的经济使用寿命，$z$为资本折现率；$c_{ij,y,k}$为第$y$阶段节点$i$、$j$间建设第$k$条候选线路对应年份的投资成本；$x_{ij,k}$为0-1变量，表示节点$i$、$j$间是否建设第$k$条回路，$x_{ij,k}=1$表示建设对应候选线路，$x_{ij,k}=0$表示不建设对应线路。

运行成本表示为：

$$C_2 = \frac{8\,760}{T}\sum_{g\in\psi_T}(a_{g,y}P_{g,c,t}^2 + b_{g,y}P_{g,c,t} + c_{g,y}) \tag{3}$$

式中：T为调度总时段数；ψ_T为火电机组集合；$a_{g,y}$、$b_{g,y}$、$c_{g,y}$为第y阶段火电机组g对应年份的发电成本系数；下标c为$N-1$情景集索引，包含正常情景和线路及机组故障情景，具体解释见1.3节；$P_{g,c,t}$为机组g在情景集c中正常情景的t时段功率。

风光弃电惩罚成本表示为：

$$C_3 = \sum_{g\in\psi_R} c_i^{Re}(P_{g,t}^{Re} - P_{g,c,t}) \tag{4}$$

式中：ψ_R为风光机组集合；c_i^{Re}为节点i的风光机组弃电惩罚成本；$P_{g,t}^{Re}$为风光机组g在t时段的最大输出功率。

切负荷惩罚成本表示为：

$$C_4 = \sum_{i\in\psi_N} c_i^D R_{i,t}^D \tag{5}$$

式中：ψ_N为系统节点集合；c_i^D为节点i的切负荷惩罚成本；$R_{i,t}^D$为节点i在t时段的切负荷量。

1.2 运行约束

考虑到候选输电走廊内多回线路的规划问题，输电线路投资约束为：

$$\underline{n} \leqslant \sum_{(i,j)\in\Omega_L} x_{ij} \leqslant \bar{n} \tag{6}$$

$$\forall x_{ij,k} \leqslant x_{ij} \tag{7}$$

$$x_{ij} \leqslant \sum_{k=1}^{\omega} x_{ij,k} \tag{8}$$

$$0 \leqslant x_{ij} \leqslant 1 \tag{9}$$

$$n_{ij}^{\min} \leqslant \sum_{k=1}^{\omega} 2^{k-1}x_{ij,k} \leqslant n_{ij}^{\max} \tag{10}$$

式中：$\bar{n}$和$\underline{n}$分别为走廊数量上、下限；x_{ij}为0-1变量，表示节点i、j间是否建设线路走廊，为提高模型计算效率，通过式(9)将其松弛为连续变量；$n_{ij}^{\min}$和$n_{ij}^{\max}$分别为走廊内线路能够建设的最小、最大数量。

式(6)为候选走廊投建数量约束；由式(7)可知，当$x_{ij,k}=1$时，$x_{ij}=1$，建设对应线路走廊；由式(8)可知，当$x_{ij,k}$全为0时，$x_{ij}=0$，不建设对应线路走廊；式(10)为一条走廊内线路投建数量约束。

系统功率平衡、机组功率、机组爬坡、节点相角等运行约束为式(11)至式(16)：

$$\sum_{g\in\psi_i} P_{g,c,t} + \sum_{ij\in L_{f(i)}} f_{ij,c,t} - \sum_{ij\in L_{t(i)}} f_{ij,c,t} = P_{i,t}^D - R_{i,t}^D \tag{11}$$

$$P_g^{\min}\boldsymbol{N}_{c2}(\gamma,\lambda) \leqslant P_{g,c,t} \leqslant P_g^{\max}\boldsymbol{N}_{c2}(\gamma,\lambda) \quad \forall g\in\psi_T \tag{12}$$

$$0 \leqslant P_{g,c,t} \leqslant P_{g,t}^{Re}\boldsymbol{N}_{c2}(\gamma,\lambda) \quad \forall g\in\psi_R \tag{13}$$

$$0 \leqslant R_{i,t}^D \leqslant P_{i,t}^D \tag{14}$$

$$\delta_g^{down}P_g^{\min} \leqslant P_{g,c,t} - P_{g,c,t-1} \leqslant \delta_g^{up}P_g^{\max} \quad \forall g\in\psi_T \tag{15}$$

$$\theta^{\min} \leqslant \theta_{i,c,t} \leqslant \theta^{\max} \tag{16}$$

式中：ψ_i为节点i的机组集合；$L_{f(i)}$和$L_{t(i)}$分别为流出、流入节点i的线路集合；$f_{ij,c,t}$为节点i、j间的潮流功率；$P_g^{\min}$和$P_g^{\max}$分别为火电机组最小、最大功率；$\boldsymbol{N}_{c2}(\gamma,\lambda)$为场景$c$中对应机组$g$的运行状态(0-1变量)，详细解释见1.3节及附录A；$P_{i,t}^D$为节点i的负荷需求；δ_g^{down}和δ_g^{up}为常规机组向下、向上爬坡速率；$\theta^{\min}$和$\theta^{\max}$分别为节点电压相角的最小、最大值；$\theta_{i,c,t}$为节点i位于情景c的t时段的电压相角。

本文假设水电机组类型包含可调和不可调两类水电机组。出力低于50 MW的小水电站视为不可调节水电。大型水电站具备日调节能力，水电机组出力约束和机组出力上限约束为式(17)、式(18)：

$$\bar{P}_g^{HY} \leqslant P_{g,c,t} \leqslant \underline{P}_g^{HY} \quad \forall g\in\psi_H \tag{17}$$

$$\sum_{t=1}^{T}P_{g,c,t}\leqslant TP_g^{\mathrm{AVE}}\qquad \forall g\in\psi_{\mathrm{H}} \tag{18}$$

式中：$\overline{P}_g^{\mathrm{HY}}$、$\underline{P}_g^{\mathrm{HY}}$分别为水电机组出力上下限；$\psi_{\mathrm{H}}$为水电机组集合；$P_g^{\mathrm{AVE}}$为水电机组平均每小时发电量，由年平均出力除以8 760 h得出。

1.3　$N-1$安全性约束

考虑到输电网静态$N-1$准则，本文构建输电线路故障情景集矩阵$\boldsymbol{N}_{\mathrm{c1}}$和机组故障情景集矩阵$\boldsymbol{N}_{\mathrm{c2}}$：

$$\begin{cases}\boldsymbol{N}_{\mathrm{c1}}=\begin{bmatrix}1 & 0 & \boldsymbol{U}_{\mathrm{c}}\\ 1 & \boldsymbol{L}_{\mathrm{c}} & 0\end{bmatrix}_{n\times(n+1)}\\ \boldsymbol{N}_{\mathrm{c2}}=\begin{bmatrix}0 & \boldsymbol{U}_{\mathrm{a}}\\ \boldsymbol{L}_{\mathrm{a}} & 0\end{bmatrix}_{a\times a}\end{cases} \tag{19}$$

式中：$\boldsymbol{N}_{\mathrm{c1}}$和$\boldsymbol{N}_{\mathrm{c2}}$中每一列为一种情景；$\boldsymbol{U}_{\mathrm{c}}$和$\boldsymbol{U}_{\mathrm{a}}$为元素全为1的上三角矩阵；$\boldsymbol{L}_{\mathrm{c}}$和$\boldsymbol{L}_{\mathrm{a}}$为元素全为1的下三角矩阵；$\boldsymbol{N}_{\mathrm{c1}}(p,q)$为第$q$个场景中第$p$条走廊的状态，$\boldsymbol{N}_{\mathrm{c2}}(s,r)$为第$r$个场景中第$s$台机组的状态，1为正常状态，0为故障状态；$n$和$a$分别为候选线路走廊数量和机组数量。$\boldsymbol{N}_{\mathrm{c1}}$包含候选线路走廊的正常情景和故障情景；$\boldsymbol{N}_{\mathrm{c2}}$包含机组故障情景。因此，场景数为$a+n+1$；$\boldsymbol{N}_{\mathrm{c1}}$的第1列元素全为1代表正常情景，机组和线路均无故障；$\boldsymbol{N}_{\mathrm{c1}}$中除第1列外的其他列和$\boldsymbol{N}_{\mathrm{c2}}$为故障情景，0元素所在行为对应线路或机组故障，详情参考附录A。

本文采用文献[26-27]中的$N-1$安全模型的二进制线路数量表达方式，通过二进制表达方式$x_{ij,1}+2x_{ij,2}+4x_{ij,3}$代替原有的线路数量表达方式$x_{ij,1}+x_{ij,2}+\cdots+x_{ij,7}$，从而减少模型中0-1变量的数量，提升模型的计算效率。

对于正常状态的候选走廊，构造潮流约束式(20)、式(21)。

$$\begin{cases}2^{k-1}b_{ij,k}(\theta_{i,c,t}-\theta_{j,c,t})+(2-x_{ij,k}-\\ \qquad\boldsymbol{N}_{\mathrm{c1}}(\alpha,\beta))M\geqslant f_{ij,c,t,k}\\ 2^{k-1}b_{ij,k}(\theta_{i,c,t}-\theta_{j,c,t})-(2-x_{ij,k}-\\ \qquad\boldsymbol{N}_{\mathrm{c1}}(\alpha,\beta))M\leqslant f_{ij,c,t,k}\end{cases} \tag{20}$$

$$2^{k-1}x_{ij,k}F_{ij,k}^{\min}\boldsymbol{N}_{\mathrm{c1}}(\alpha,\beta)\leqslant f_{ij,c,t,k}\leqslant 2^{k-1}x_{ij,k}F_{ij,k}^{\max}\boldsymbol{N}_{\mathrm{c1}}(\alpha,\beta) \tag{21}$$

式中：$b_{ij,k}$为节点i,j间第k条回路的电纳；$f_{ij,c,t,k}$为节点i、j间的第k条回路位于情景c的t时段潮流功率；M为一较大正值；$F_{ij,k}^{\max}$和$F_{ij,k}^{\min}$分别为节点i、j间线路走廊内第k条回路功率的上、下限；$\boldsymbol{N}_{\mathrm{c1}}(\alpha,\beta)$为场景$c$中对应节点$i$、$j$间线路走廊的运行状态，具体含义见附录B。

对于$N-1$故障态候选线路，若候选线路走廊已投建线路，走廊内线路数量减1，若候选线路走廊未投建线路，则为0，其数学表达为：

$$\left(\sum_{k=1}^{\omega}2^{k-1}x_{ij,k}-1\right)I=\left(\sum_{k=1}^{\omega}2^{k-1}x_{ij,k}-1\right)\left[1-\prod_{k=1}^{\omega}(1-x_{ij,k})\right] \tag{22}$$

式中：I为标志符，若节点i、j间线路走廊投建线路则为1，需保证走廊内线路数量减1，若不投建线路，则为0；逻辑判断由$1-\prod_{k=1}^{\omega}(1-x_{ij,k})$实现，当$\omega=2$时，一条走廊内最大可投建线路数量为3，有

$$\left(\sum_{k=1}^{2}2^{k-1}x_{ij,k}-1\right)\times 1=x_{ij,1}x_{ij,2}+x_{ij,2} \tag{23}$$

为线性化式(23)中的$x_{ij,1}x_{ij,2}$，本文定义0-1变量$x_{ij,12}$等于$x_{ij,1}x_{ij,2}$。通过式(24)所示约束将$x_{ij,12}$松弛为连续变量。

$$\begin{cases}x_{ij,12}\leqslant x_{ij,1}\\ x_{ij,12}\leqslant x_{ij,2}\\ x_{ij,1}+x_{ij,2}-1\leqslant x_{ij,12}\end{cases} \tag{24}$$

假设$\tilde{x}_{ij,1}=x_{ij,12}$，$\tilde{x}_{ij,2}=x_{ij,2}$，通过构建多条线路潮流约束实现现有线路的$N-1$故障效果，其等效潮流约束和不同情景下的潮流选择如式(25)至式(27)所示。

$$\begin{cases}b_{ij,v}(\theta_{i,c,t}-\theta_{j,c,t})+(1-\tilde{x}_{ij,v}+\boldsymbol{N}_{\mathrm{c1}}(\alpha,\beta))M\geqslant f_{ij,c,t,v}\\ b_{ij,v}(\theta_{i,c,t}-\theta_{j,c,t})-(1-\tilde{x}_{ij,v}+\boldsymbol{N}_{\mathrm{c1}}(\alpha,\beta))M\leqslant f_{ij,c,t,v}\end{cases} \tag{25}$$

$$\tilde{x}_{ij,v}F_{ij,k}^{\min}(1-\boldsymbol{N}_{\mathrm{c1}}(\alpha,\beta))\leqslant f_{ij,c,t,v}\leqslant \tilde{x}_{ij,v}F_{ij,k}^{\max}(1-\boldsymbol{N}_{\mathrm{c1}}(\alpha,\beta)) \tag{26}$$

$$f_{ij,c,t}=\begin{cases}\sum_{v=1}^{\omega-1}f_{ij,c,t,v} & \text{故障情景}\\ \sum_{k=1}^{\omega}f_{ij,c,t,k} & \text{正常情景}\end{cases} \tag{27}$$

式中：$b_{ij,v}$为节点i、j间第v条等效线路的电纳；$\tilde{x}_{ij,v}$为表示节点i、j间是否建设第v条等效线路的状态变量；$f_{ij,c,t}$为不同场景下的潮流功率。

1.4　防孤岛约束

网络连通性是电力系统网架结构的基本特征，本文通过虚构潮流来实现防孤岛约束[28]，其节点虚拟功率平衡方程如式(28)、式(29)所示。

$$P_g^{\mathrm{H}}+\sum_{ij\in\Omega_{f(i)}}f_{ij}^{\mathrm{H}}-\sum_{ij\in\Omega_{t(i)}}f_{ij}^{\mathrm{H}}=R_i^{\mathrm{H}}\qquad \forall g\in\psi_{\mathrm{W}} \tag{28}$$

$$-Nx_{ij}\leqslant f_{ij}^{\mathrm{H}}\leqslant Nx_{ij} \tag{29}$$

式中：P_g^{H}为虚拟机组g的功率；R_i^{H}为节点i的虚拟需求；$\Omega_{f(i)}$和$\Omega_{t(i)}$分别为从节点i流出、流入的虚拟线

路集；f_{ij}^{H}为表征节点i、j间虚拟线路潮流的连续变量；ψ_W为虚拟机组集合；N为节点数。假设所有节点都有大小为1的虚拟需求，某一节点虚拟机组功率大小为N，其余节点功率为零。由于功率由唯一节点提供，需新建线路连通各个节点，从而避免孤岛产生。最后，通过变量x_{ij}使得虚拟网络和输电网网架结构演化模型耦合，从而保证拓扑结构连通性。

2　新型输电网测试系统生成框架

2.1　三代电网理念

本文基于三代电网理念中各阶段电网的形态和运行特征确立各阶段网架结构演化的依据和约束条件[29]。框架以500 kV超高压输电线路的投建和可再生能源机组的大规模并网作为关键时间节点，将500 kV超高压输电线路的投建前视为阶段1；投建500 kV超高压输电线路却并未投建可再生能源机组作为阶段2；出现可再生能源机组的投建作为阶段3[30]，不同阶段的输电网扩展规划模型由不同的目标函数和约束条件构成，演化框架如图1所示。

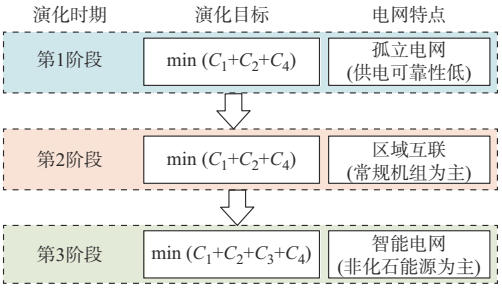


图1　输电网网架结构演化模型
Fig. 1　Evolution model of transmission network structure

阶段1：早期的输电网规划方案受限于经济水平无法提供足够的线路输送裕量，系统可靠性较低，故不添加$N-1$约束。此外，阶段1以孤立或链状小电网为主，故不考虑防孤岛约束。模型目标函数为最小化线路投资成本C_1、运行成本C_2和切负荷惩罚成本C_4，有

$$\begin{cases}\min(C_1+C_2+C_4)\\ \text{s.t.}\quad \text{式(6)至式(12)，式(14)至式(18)，式(20)，式(21)}\end{cases}\tag{30}$$

阶段2：随着经济的发展，电网对系统可靠性的要求越来越高，故模型添加$N-1$约束。阶段2的电网通过500 kV线路实现区域互联，故添加防孤岛约束。模型目标函数与阶段1相同，有

$$\begin{cases}\min(C_1+C_2+C_4)\\ \text{s.t.}\quad \text{式(6)至式(12)，式(14)至式(18)，式(20)，式(21)，式(24)至式(29)}\end{cases}\tag{31}$$

阶段3：非化石能源的装机容量占比增加，模型考虑风光出力约束。为提高电网对可再生能源的消纳，模型目标函数添加了风光弃电惩罚成本C_3，有

$$\begin{cases}\min(C_1+C_2+C_3+C_4)\\ \text{s.t.}\quad \text{式(6)至式(18)，式(20)，式(21)}\\ \qquad \text{式(24)至式(29)}\end{cases}\tag{32}$$

2.2　候选线路生成

本文通过Delaunay三角剖分生成候选线路集。Delaunay三角剖分是一种对离散点集进行三角划分的几何算法，其构建的网络具备以下2个特征。

1)空圆性质：一个三角形的外接圆范围内(边界除外)，不包含离散点集中的任何其他顶点。

2)最大化最小角准则：在离散点集的所有三角剖分技术中，Delaunay三角剖分得到的最小角(所有三角形的内角中的最小值)是最大的。相比于非Delaunay三角剖分，它避免了三角形的内接圆中包含离散点集内其他点的情况，使用Delaunay三角剖分所规划的线路的拓扑结构特征更接近真实的输电线路[18]。

2.3　新型输电网测试系统生成流程

测试系统生成流程图如图2所示。

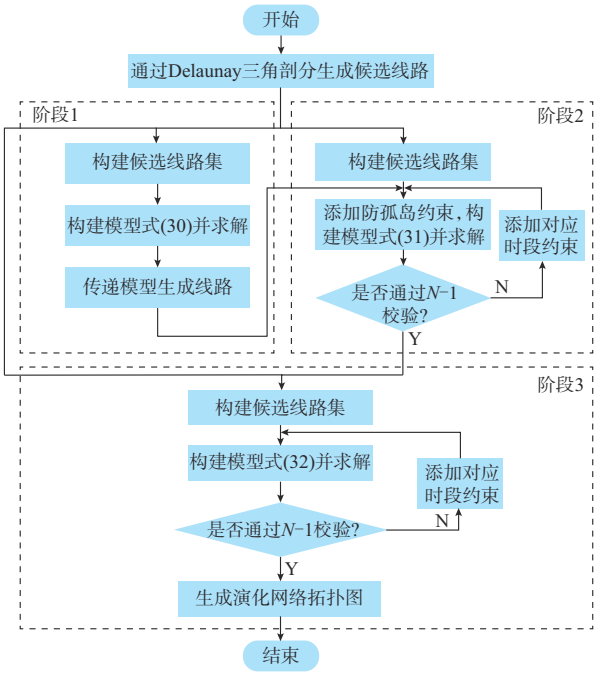


图2　新型输电网测试系统生成流程图
Fig. 2　Flow chart of generation of new transmission network testing system

$N-1$安全性约束使得优化模型的规模急剧增大，为提高求解效率，本文通过迭代方式进行模型求解。具体为求解正常情景模型，随后根据$N-1$校验结果添加对应时段和线路的安全约束。新型测试

系统生成步骤如下：

步骤1：基于各节点经纬度构造有限散点集，通过Delaunay三角剖分算法生成候选线路，将式(30)作为阶段1的演化模型。

步骤2：将阶段1生成的网架结构作为已建线路，构建候选线路集，将模型式(31)作为阶段2演化模型，对网架结构进行$N-1$校验。

步骤3：将阶段2生成的网架结构作为已建线路，构建候选线路集。将模型式(32)作为阶段3演化模型，对网架结构进行$N-1$校验。

2.4　基于复杂网络的拓扑特征评估

鉴于电网数据的保密性，无法直接与实际电网进行对比分析。因此，本文基于复杂网络理论对拓扑合理性进行评估。复杂网络理论从拓扑层面对电气特征进行分析，如结构脆弱性、鲁棒性、网络效率等[31]。复杂网络的通用特征参数如下：

1)节点度数K_i：定义为连接节点i的边的数量，是衡量节点连通度的重要指标。其延伸出的平均节点度K和度分布是复杂网络分析中的重要指标。电力系统的节点数和支路数量呈高度线性关系，且平均度数不会随着电力系统的增大而大幅度波动[17-18]。世界各地输电系统的平均度数为2～3，故本文通过式(33)计算可得各阶段的$\bar{n}$和$\underline{n}$，确保测试系统中走廊数量的上下限接近真实电网[32]。

$$K=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}K_i=\frac{2l}{N} \tag{33}$$

式中：K为平均节点度；l为线路数。

真实电力系统的度分布具有以下特征：度分布在较小度数(平均节点度附近)如2或3处具有局部最大值；度分布的尾部呈现指数衰减。因此，拟合结果和度分布特征可用于电力系统特征的评估验证[17]。

2)特征路径长度L：定义连接两节点的最少边的数量为最短路径长度，网络中所有节点对的最短路径长度的平均值为特征路径长度，可表征网络中节点间的平均距离和信息传递速度。计算公式为：

$$L=\frac{1}{N(N-1)}\sum_{i\neq j}l_{ij} \tag{34}$$

式中：l_{ij}为节点i、j之间的最短路径长度。

3)平均聚类系数C^{v}：定义为用于衡量网络中节点聚集程度的指标，表示节点在局部区域内彼此连接的紧密程度。公式如下：

$$C_i^{\mathrm{v}}=\frac{2R_i}{k_i(k_i-1)N} \tag{35}$$

$$C^{\mathrm{v}}=\frac{\sum_{i=1}^{N}C_i^{\mathrm{v}}}{N} \tag{36}$$

式中：C_i^{v}为节点i的聚类系数；k_i为节点i的近邻节点数，即与节点i相连的节点数量；R_i为节点i的近邻节点关系数，即节点i的相邻节点彼此相连的数量。

高压电网已被证明具有小世界网络特性[23]，故本文将是否具备小世界网络特性作为检验指标之一。小世界网络拓扑特征：C^{v}远大于C_{r}，L大于等于L_{r}。其中，C_{r}和L_{r}分别为相同节点数和平均度数的随机网络的平均聚类系数和特征路径长度，可通过式(37)和式(38)计算。

$$C_{\mathrm{r}}\approx\frac{K}{N} \tag{37}$$

$$L_{\mathrm{r}}\approx\frac{\ln N}{\ln K} \tag{38}$$

3　仿真结果分析

3.1　算例介绍

本文以某省电网为例，通过所提方法构建反映各阶段电网特征的新型输电网测试系统。算例以各区(县)为电力节点，将一个区(县)的220 kV变电站聚类为一个节点，通过输电网扩展规划模型构建220 kV电力网架结构。根据该省相关统计数据与国家发改委公布的各省最大、最小日负荷曲线，计算得到各节点逐小时负荷曲线。机组数据参考文献[33-34]，其中，风光时序出力曲线数据参考文献[35]。

500 kV超高压交流输电线路数据参考文献[36]，本文通过半正矢公式计算两点间距离，从而得到输电线路的阻抗、载流量、传输容量等线路参数。采取π型等值电路模型进行输电线路建模，计算方法参考文献[37]。考虑到跨省超高压直流输电线路的影响，本文在换流站所在变电站节点设置一台虚拟发电机，从而模拟跨省输电对演化模型的影响。本文采用k-means聚类方法得到风/光典型出力场景集。具体数据需求及模型生成结果如附录B表B1所示，并采用YALMIP与GUROBI进行建模与求解。

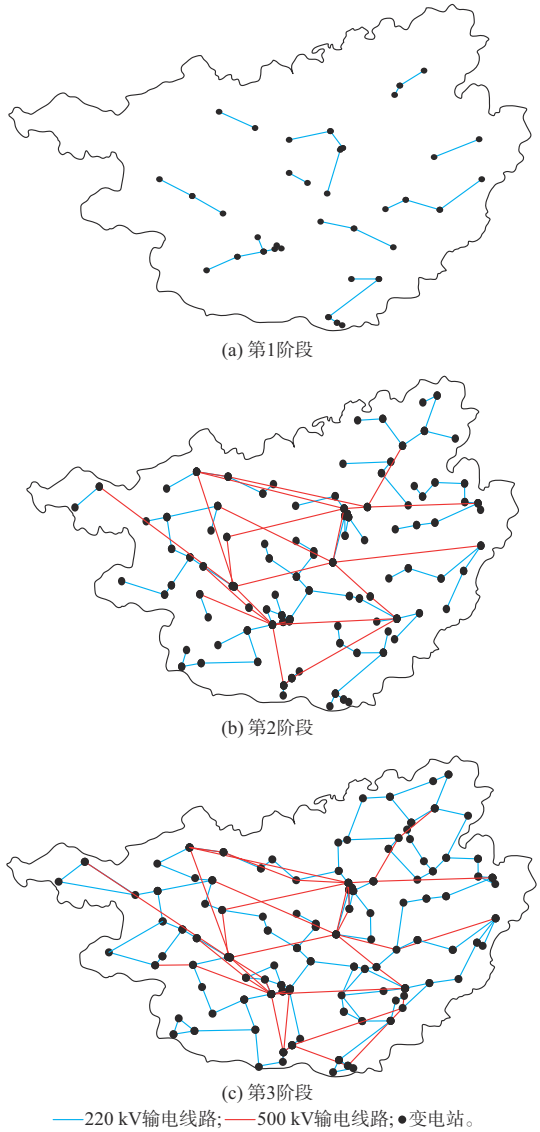
为验证所提方法的有效性，本文设置4个场景。场景S1：本文所提方法；场景S2：只添加500 kV超高压线路后求解第3阶段，不进行多阶段演化；场景S3：考虑多阶段演化过程，演化过程中不添加500 kV超高压线路；场景S4：传统合成网络[18]。

3.2　网架结构分析

3.2.1　各阶段网络特征分析

场景S1各阶段的电网网架如图3所示。第1阶段如图3(a)所示：电网处于建设初期，低负荷需求

的节点与小容量机组就近相连，总体呈现链状的孤立电网零星分布，符合早期电网结构特征。



(a) 第1阶段

(b) 第2阶段

(c) 第3阶段

——220 kV输电线路；——500 kV输电线路；●变电站。

图3　三阶段电网网架结构

Fig. 3　Three-stage network architecture of power grid

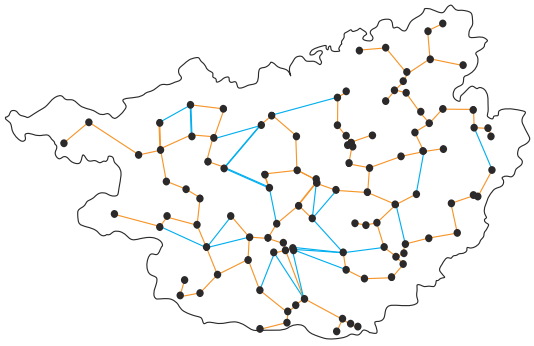
第2阶段如图3(b)所示：节点数量显著增加，220 kV输电线路以大容量机组为中心呈放射状或环状分布，呈现出区域电网的特征，在防孤岛约束的作用下由500 kV超高压输电线路实现远距离互联。

第3阶段如图3(c)所示：节点数并未明显增加，但彼此连接程度更高，在可再生能源功率的波动性和防孤岛约束的作用下，220 kV电压等级输电网完全连通且在部分市区呈环状分布。

输电网网架结构从需求小、可靠性低的第1代小机组低电压电网到局部聚集、超高压远距离连接的第2代超高压互联电网，最终过渡到高比例可再生能源、高压互联分摊负荷需求的第3代智能电网。演化过程中的发电类型占比及容量和500 kV超高压输送线路的设置基于公开数据，符合当地的电网演化特征。演化所得220 kV线路与500 kV输电线路相耦合形成的环网及链式网络布局符合真实电网的网架结构特征。因此，演化模型在各阶段的网架结构能够反映当地电网发展规律。

3.2.2　合成网络方法对比

场景S4的网架结构如图4所示。传统合成网络基于Delaunay三角剖分构造候选线路集合，随后通过最小生成树选出初始线路走廊集。进而通过迭代的方式逐条添加线路并进行直流潮流计算，直至最优潮流收敛且线路走廊数为设定值。



——通过最小生成树选出的初始线路；——增添线路；●变电站。

图4　传统合成网络网架结构

Fig. 4　Traditional synthetic network architecture

由图4可知，由于传统合成网络方法以线路传输功率作为评价指标，且未考虑超高压输电线路的影响，相较于图3(c)，中部地区的高负荷区域需要大量外送电满足负荷需求，使得模型倾向于在负荷需求大的区域构建紧凑的网状电网。

最后，该模型在迭代添加线路过程中只考虑到网络连通性和网络特征是否符合真实电网，未考虑运行和建设成本及各类不确定因素，无法满足电网建设的经济性原则和$N-1$要求。

3.3　拓扑模型对比分析

3.3.1　度分布对比

为了验证本文所提演化模型的有效性，本文对比了IEEE-2737节点系统和HPR-38节点系统[8]的初值化节点度分布结果，如图5所示。由图可知，场景S1演化网络和IEEE-2737节点系统、HPR-38节点系统具有相同的度分布特点，即度分布在节点度为2处最高，尾部呈指数衰减[38]。

3.3.2　小世界网络特征

以场景S1、美国输电网[39]、基于北欧输电网的开源模型PyPSA-Eur[40]和基于南卡罗来纳州的合成网络ACTIVSg500[18]为例。由表1可知，对比美国输电网和北欧输电网，采用Delaunay三角剖分生

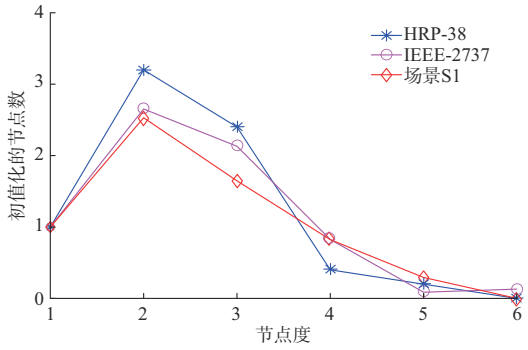


图5　初值化节点度分布对比示意图

Fig. 5　Comparison of initialized node degree distributions

成候选线路的场景S1和ACTIVSg500的平均聚类系数高0.049～0.078。这是因为Delaunay三角剖分的三角质量最优性使得一个节点的邻节点具备相连的基础，更易形成三角形，从而提升平均聚类系数。

表1　高压输电网特征参数统计分析

Table 1　Statistical analysis of high-voltage transmission network characteristic parameters

算例场景	K	C^{v}	L	C_r	L_r
S1(220 kV)	2.50	0.169	10.74	0.023	5.10
S2(220 kV)	2.46	0.240	15.29	0.023	5.20
S3(220 kV)	2.54	0.100	8.76	0.024	5.00
S4(220 kV)	2.45	0.064	9.13	0.023	5.20
美国输电网(345 kV)	2.56	0.120	7.04	0.002	5.90
PyPSA-Eur(220 kV)	2.46	0.102	13.12	0.014	5.69
ACTIVSg500(345 kV)	2.45	0.180	5.03	0.070	3.80

从表1数据可得，各场景的平均聚类系数C^{v}远大于同节点数、同线路数随机网络的C_r，而特征路线长度L大于同节点数、同线路数随机网络的L_r，所以本文所提方法构建的输电网网架结构和美国输电网、PyPSA-Eur、ACTIVSg500同样具备小世界网络特性，且平均节点度符合真实电力系统平均节点度范围。

3.3.3　多场景对比分析

为研究超高压输电线路和电网的多阶段演化过程对电网拓扑结构的影响。本文通过表1中3个场景的对比结果，分析演化过程中多电压等级电网相互影响。

1）场景S1和S2的平均聚类系数比S3高0.069～0.14。其主要原因为模型本身的最优性使得220 kV线路趋向于依赖超高压线路远距离输送电能，从而围绕超高压节点建设线路并彼此相连提升系统供电可靠性。对比场景S1与S3可知，S3无法依赖超高压线路远距离传输电能，需要新建更多线路从而满足负荷需求，所以在平均度数最高的情况下场景S3的平均聚类系数为0.1，低于S1和S2。

2）场景S1的特征路径长度为10.74，比S3高1.98。考虑到500 kV超高压输电线路的存在，网络本身更趋向于区域聚集，220 kV线路的各区域间联系主要依赖超高压输电线路。因此，S1的220 kV输电网络相比S3区域互联不够紧密。

3）场景S4的平均聚类系数为0.064，一方面，模型倾向于在负荷需求大的区域构建电网，使得个别节点的聚类系数较高，其平均聚类系数与其他场景相比最低。另一方面，模型需要以最小生成树为初始线路，然而最小生成树的网络结构并不符合电网演化规律[21]，故其特征参数与其他场景有较大差异，无法模拟电网的演化过程。

电网多阶段演化过程对网架演化的影响如下：

1）场景S1和S3的平均度数比S2高0.04～0.08。这是因为演化过程中各阶段已有线路的存在削弱了其下一阶段模型规划的最优性，模型需新建更多的线路来满足供需平衡。

2）场景S2的平均聚类系数和特征路径长度最高，分别为0.24和15.29。因为不考虑多阶段演化过程的影响，220 kV输电线路以超高压节点聚集的趋势并未被遏制，所以会产生局部聚集的效果，从而提升平均聚类系数。但是过于聚集的趋势使得S2中220 kV输电网络各个区域间的联系更为稀疏。

综上，超高压输电线路的架设使得220 kV线路更为依赖超高压远距离传输电能，从而减小综合成本，使得220 kV网络整体平均聚类系数更高。而在多阶段演化过程中，已有线路的存在削弱了模型的最优性，为了在已有线路基础上保证电力系统供需平衡，模型趋向于铺设更多的线路彼此互联，使得综合成本更高。因此，本文所提方法能够表征高电压等级输电线路和电网演化过程对于输电网网架结构演化的影响，相较于迭代式方法构建拓扑结构，更符合实际输电网网架结构演化过程。

3.4　基准规划方案测试

为验证新型输电网测试系统的有效性[7-8]，本文参考文献[41]，通过输电网结构优化进行算例测试。考虑到可再生能源大规模并网使得系统输电阻塞问题愈发严重，电力系统网架规划需预留较多的安全裕度。在实际运行过程中，在不影响电网安全运行下可通过网络重构方式，降低运行成本。模型的目标函数为最小化运行成本C_2、风光弃电惩罚成本C_3和切负荷惩罚成本C_4，有

$$\min(C_2+C_3+C_4) \tag{39}$$

系统运行约束条件为式(11)至式(18)、式(20)、式(21)、式(28)、式(29)和式(40)。式(40)表

示线路开断数量限制。

$$\sum_{(i,j)\in\Omega_L}\sum_{k=1}^{\omega}2^{k-1}x_{ij,k}\leqslant Y \tag{40}$$

式中：Y为最大允许的线路开断数目。为更好地体现输电网结构优化对机组运行费用的影响，本文以构建的测试系统即场景S1为例，设置开断线路数为0、1、3、5、7条5种情况，优化结果如表2所示。

表2 输电网结构优化结果
Table 2 Structure optimization results of transmission network

断开线路数	断开线路	机组运行费用/(美元/h)
0		131 403
1	11-57	124 744
3	11-57,13-14,79-80	124 327
5	3-4,11-57,67-68,67-68,84-86	120 716
7	3-4,11-57,67-68,67-68,12-56,12-65,56-57	120 604

由表2可知，设置为断开1条和5条线路时，机组运行成本分别为124 744美元/h和120 716美元/h，与无断开线路相比降低了5.07%和8.13%。由此可见，通过改变网架的拓扑结构，能够改变电网的潮流分布，进而调整机组出力，降低运行费用。

进一步，由表2分析可知，断开3条线路后，机组运行成本为124 327美元/h，相较于断开1条线路仅降低了0.33%。断开7条线路后，机组运行成本为120 604美元/h，相较于断开5条线路仅降低了0.09%。因此，部分线路的开断对机组运行成本的影响较小。而在表中设置为断开1条线路时，11-57线路的断开能降低5.07%的机组运行费用。在设置为断开5、7条线路时，线路11-57同样断开，说明关键线路的开断能大幅改变网架的潮流分布，降低机组运行成本。

综上所述，本文构建的新型输电网测试系统与真实的网架结构相比同样具有充裕的线路安全裕度，能够在短期运行时通过网络重构降低运行成本，提高可再生能源消纳。

4 结语

本文基于三代电网演化模型，提出一种输电网新型测试系统生成方法，有以下结论：

1)新型输电网测试系统生成方法可用于构建中国各省份的输电网测试系统；所提方法基于公开数据，不涉及电网保密数据，测试集数据已共享。

2)通过仿真对比揭示了演化过程对网架结构搭建的影响，并表征了超高电压等级电网的作用下高压输电网的局部聚集特性。

3)提供了某省开源电力系统数据集，包含风电、光伏、水电、煤电、气电、核电与抽水蓄能的机组信息(包括机组容量、经纬度与发电成本信息)，时序数据包括负荷小时级曲线和风光出力小时级曲线，220 kV与500 kV输电线路网架数据，该数据集可用于电力系统经济调度、电网电源与输电网扩展规划等研究领域。此外，可增加可再生能源渗透率、储能单元等，分析高比例可再生能源、储能等接入下对省级电网运行与规划的影响。

本文所提方法适用于高压输电网的测试算例构建，所得测试算例能够反映当前电力系统的网络特征。考虑到可再生能源渗透率持续增加，如何构建反映未来电力系统的测试算例将是后续研究方向。

本文测试系统相关数据已共享，可在网站支撑数据处下载(http://www.aeps-info.com/aeps/article/abstract/20240409003)。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx)，扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

[1] 黎博，陈民铀，钟海旺，等.高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J].中国电机工程学报，2023，43(2)：555-580.
LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-580.

[2] 康重庆，姚良忠.高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J].电力系统自动化，2017，41(9)：2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.

[3] PEYGHAMI S, DAVARI P, FOTUHI-FIRUZABAD M, et al. Standard test systems for modern power system analysis: an overview[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2019, 13(4): 86-105.

[4] MOHAMMADI M H, SALEH K. Synthetic benchmarks for power systems[J]. IEEE Access, 2021, 9: 162706-162730.

[5] 路帅超，孙英云，赵鹏飞，等.新型电力系统多阶段输-储协同分布鲁棒规划[J].电力系统自动化，2024，48(15)：15-24.
LU Shuaichao, SUN Yingyun, ZHAO Pengfei, et al. Multi-stage transmission-storage cooperative distributionally robust planning for new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(15): 15-24.

[6] 赵晋泉，汤奕，党杰，等.计及高比例新能源多种控制方式及运行约束的连续潮流[J].电力系统自动化，2024，48(16)：123-131.
ZHAO Jinquan, TANG Yi, DANG Jie, et al. Continuous power flow considering multiple control modes and operational constraints of high proportion of renewable energy [J].

Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(16): 123-131.
[7] BARROWS C, PRESTON E, STAID A, et al. The IEEE reliability test system: a proposed 2019 update [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 119-127.
[8] ZHUO Z Y, ZHANG N, YANG J W, et al. Transmission expansion planning test system for AC/DC hybrid grid with high variable renewable energy penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2597-2608.
[9] 李傲伟，柳璐，程浩忠，等.高比例可再生能源接入下考虑输配协同的输电网规划测试系统[J].电力系统自动化，2021，45(11)：19-27.
LI Aowei, LIU Lu, CHENG Haozhong, et al. Transmission expansion planning test system considering transmission and distribution coordination with integration of high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 19-27.
[10] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393: 440-442.
[11] CUADRA L, SALCEDO-SANZ S, DEL SER J, et al. A critical review of robustness in power grids using complex networks concepts[J]. Energies, 2015, 8(9): 9211-9265.
[12] WANG Z F, SCAGLIONE A, THOMAS R J. Generating statistically correct random topologies for testing smart grid communication and control networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 28-39.
[13] FORSBERG S, THOMAS K, BERGKVIST M. Power grid vulnerability analysis using complex network theory: a topological study of the Nordic transmission grid [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2023, 626: 129072.
[14] HU J L, SANKAR L, MIR D J. Cluster-and-Connect: an algorithmic approach to generating synthetic electric power network graphs [C]// 2015 53rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton), September 29-October 2, 2015, Monticello, USA.
[15] RODRIGUEZ-AGUILAR R. A hybrid model to simulate test cases of electrical power systems[J]. Applied Sciences, 2020, 10(10): 3531.
[16] SCHULTZ P, HEITZIG J, KURTHS J. A random growth model for power grids and other spatially embedded infrastructure networks [J]. The European Physical Journal Special Topics, 2014, 223(12): 2593-2610.
[17] GEGNER K M, BIRCHFIELD A B, XU T, et al. A methodology for the creation of geographically realistic synthetic power flow models [C]// 2016 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), February 19-20, 2016, Urbana, USA.
[18] BIRCHFIELD A B, XU T, GEGNER K M, et al. Grid structural characteristics as validation criteria for synthetic networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 3258-3265.
[19] ARRAÑO-VARGAS F, KONSTANTINOU G. Longitudinal power systems for modern and future grid studies: a graph theory analysis[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2023, 35: 101132.
[20] WU D Q, ZHENG X T, XU Y X, et al. An open-source extendable model and corrective measure assessment of the 2021 texas power outage [J]. Advances in Applied Energy, 2021, 4: 100056.
[21] ABU-KHALIFA Y A, BIRCHFIELD A B. Techniques for creating synthetic combined electric and natural gas transmission grids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(4):4734-4743.
[22] LIU M V, YUAN B, WANG Z J, et al. An open source representation for the NYS electric grid to support power grid and market transition studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(4): 3293-3303.
[23] ESPEJO R, LUMBRERAS S, RAMOS A. A complex-network approach to the generation of synthetic power transmission networks [J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(3): 3050-3058.
[24] 国网北京经济技术研究院.电网规划设计手册[M].北京：中国电力出版社，2016.
State Grid Beijing Institute of Economics and Technology. Grid planning and design manual[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
[25] 杨修宇，郭琪，刘雪媛，等.计及弃风事件耦合关系的源-储-网联合规划方法[J].电力系统自动化，2023，47(2)：53-60.
YANG Xiuyu, GUO Qi, LIU Xueyuan, et al. Joint source-storage-grid planning method considering coupling relationship of wind power curtailment events [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(2): 53-60.
[26] RAHMANI M, ROMERO R, RIDER M J. Strategies to reduce the number of variables and the combinatorial search space of the multistage transmission expansion planning problem [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2164-2173.
[27] ZHANG Y, WANG J X, LI Y H, et al. An extension of reduced disjunctive model for multi-stage security-constrained transmission expansion planning [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 1092-1094.
[28] PANG K Y, WANG C Y, HATZIARGYRIOU N D, et al. Formulation of radiality constraints for optimal microgrid formation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(6): 5341-5355.
[29] 周孝信，陈树勇，鲁宗相.电网和电网技术发展的回顾与展望——试论三代电网[J].中国电机工程学报，2013，33(22)：1-11.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang. Review and prospect for power system development and related technologies: a concept of three-generation power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 1-11.
[30] 梅生伟，龚媛，刘锋.三代电网演化模型及特性分析[J].中国电机工程学报，2014，34(7)：1003-1012.
MEI Shengwei, GONG Yuan, LIU Feng. The evolution model of three-generation power systems and characteristic analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1003-1012.
[31] 潘松，李长城，康海鹏，等.考虑停运概率熵和网架结构熵的电网关键线路辨识方法[J].电力系统自动化，2025，49(1)：

139-149.
PAN Song, LI Changcheng, KANG Haipeng, et al. Identification method for key lines of power grid considering outage probability entropy and grid structure entropy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1): 139-149.
[32] AMANI A M, JALILI M. Power grids as complex networks: resilience and reliability analysis [J]. IEEE Access, 2021, 9: 119010-119031.
[33] 万文华,梁雪容,郑航,等.中国水电站数据库构建、验证与定量分析[J].水利水电技术,2022,53(12):185-95.
WAN Wenhua, LIANG Xuerong, ZHENG Hang, et al. Database construction, verification and quantitative analysis of hydropower stations in China [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(12): 185-95.
[34] World Resources Institute. Global power plant database [EB/OL]. (2021-06-24) [2024-04-09]. https://datasets. wri. org/dataset/globalpowerplantdatab-ase.
[35] PFENNINGER S, STAFFELL I. Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data [J]. Energy, 2016, 114: 1251-1265.
[36] 张云飞.广西500 kV电网中远期发展研究[J].中国电力教育,2011(3):93-95.
ZHANG Yunfei. Study on medium and long-term development of Guangxi 500 kV power grid [J]. China Electric Power Education, 2011(3): 93-95.
[37] PowerWorld. PowerWorld Simulator [EB/OL]. (2023-10-26) [2024-04-09]. https://www. powerworld. com/WebHelp/Default.htm#MainD.ocumentati.
[38] MEI Shengwei, ZHANG Xuemin, CAO Ming. Power grid complexity[M]. Berlin, Germany: Springer, 2011.
[39] Homeland Infrastructure Foundation Level Database. Transmission lines [EB/OL]. (2023-6-30) [2024-04-09]. https://hifldgeopLatform. opendata. arcgi-s. com/datasets/geoplatform:ransmission-lines/explore.
[40] HÖRSCH J, HOFMANN F, SCHLACHTBERGER D, et al. PyPSA-Eur: an open optimisation model of the European transmission system [J]. Energy Strategy Reviews, 2018, 22: 207-215.
[41] 杨知方,钟海旺,夏清,等.输电网结构优化问题研究综述和展望[J].中国电机工程学报,2016,36(2):426-434.
YANG Zhifang, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. Review and prospect of transmission topology optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 426-434.

黎 博(1992—),男,博士,助理教授,硕士生导师,主要研究方向:电力系统优化规划、电网与电动汽车互动等。E-mail:boli@gxu.edu.cn

魏光瑞(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向:输电网规划及运行。E-mail:2212392116@st.gxu.edu.cn

钟海旺(1986—),男,通信作者,博士,副教授,IEEE高级会员,主要研究方向:智能电网、电力市场、需求侧响应、电网优化运行等。E-mail:zhonghw@tsinghua.edu.cn

(编辑 代长振)

Generation Method for New Transmission Network Test System Based on Power Grid Evolution Model

LI Bo[1,2], *WEI Guangrui*[1], *ZHONG Haiwang*[2], *LIU Hui*[1]

(1. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;
2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The IEEE test case has been widely used for simulation testing in various fields such as power system planning and operation. However, due to concerns of data privacy protection, it is difficult to access publicly available datasets of actual power system generation and network structures. To address the issue, based on the evolution model of three-generation power grids, a generation method for the new transmission network test system is proposed to build test cases that reflect actual power system characteristics. First, a transmission network expansion planning model considering $N-1$ security constraints is established. Secondly, the optimization objectives and constraints are proposed according to the characteristics of different stages of network development to simulate the evolution process of the power grids. To enhance the solving efficiency of the model, a binary representation method of planned lines of transmission corridors is introduced to reduce the number of 0-1 variables. Finally, taking a provincial power grid as a case, an open-source power system testing system is constructed. The validity of the constructed testing system is verified based on the statistical properties of complex networks. Furthermore, the test case is applied to the optimization of transmission network structures to verify its rationality.

This work is supported by the Specific Research Project of Guangxi for Research Bases and Talents (No. 2022AC21257) and National Natural Science Foundation of China (No. 52122706).

Key words: transmission network; expansion planning model; testing system; $N-1$ security constraint; power grid evolution model