

基于免疫算法的电网拓扑结构识别

董宸¹, 吴强², 黄河², 章锐³, 杨秀媛^{4*}

(1. 阳光电源(南京)有限公司, 江苏省 南京市 210000; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏省 南京市 210000; 3. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001; 4. 北京信息科技大学自动化学院, 北京市 海淀区 100192)

Power Grid Topology Identification Based on Immune Algorithm

DONG Chen¹, WU Qiang², HUANG He², ZHANG Rui³, YANG Xiuyuan^{4*}

(1. SUNGROW (Nanjing) Co., Ltd., Nanjing 210000, Jiangsu Province, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, Jiangsu Province, China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China; 4. School of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Haidian District, Beijing 100192, China)

摘要: 基于大电网运动轨迹识别电网拓扑结构, 对实现信息驱动的大电网运行态势感知与智能控制具有重要意义。首先, 基于电网功率平衡原理和潮流约束, 将电网拓扑结构识别归结为寻求盒子与小球全局最优组合问题, 从全新角度给出电网拓扑识别思路, 简化了传统电网拓扑识别的复杂流程。其次, 根据母线节点功率流通平衡特性, 建立了电网拓扑结构识别数学模型, 从全局寻优角度提高了电网拓扑识别效率, 同时引入电压损耗以克服电网拓扑识别不唯一问题。再次, 采用免疫智能算法对该模型进行求解, 该算法有效保持了抗体多样性, 避免了早熟收敛问题。最后, 在IEEE 39、IEEE 118节点系统上进行了测试, 验证了方法的有效性。

关键词: 新型电力系统; 电网; 拓扑识别; 免疫算法; 信息驱动

ABSTRACT: Power grid topology identification for large power grid trajectories is of great significance for information-driven large power grid operation situation awareness and intelligent control. Firstly, based on the principle of power balance and power flow constraints, the identification of power grid topology was reduced to the problem of seeking the global optimal combination of box and ball. The idea of power grid topology identification was given from a new perspective, which simplified the complex process of traditional power grid topology identification. Secondly, according to the power flow balance characteristics of bus

nodes, a mathematical model of power grid topology identification was established, which improved the efficiency of power grid topology identification from the perspective of global optimization. At the same time, the voltage loss was introduced to overcome the non-uniqueness problem of power grid topology identification. Thirdly, the immune intelligent algorithm was used to solve the model. The algorithm effectively maintained the diversity of antibodies and avoided the premature convergence problem. Finally, the proposed method was tested on IEEE 39 and IEEE118 bus systems to verify the effectiveness.

KEY WORDS: new power system; power grid; topology identification; immune algorithm; information-driven

0 引言

在双碳目标下, 新型电力系统运行复杂性将显著增加^[1-4]。现有以建模仿真和预想故障为核心的电网在线安全防御系统受到严峻挑战^[5-7]。广域量测技术^[8-9]的发展为新型电力系统在线安全分析与控制提供了良好的支撑^[10-11]。

把握电网拓扑结构及其动力学属性, 是实现新型电力系统安全稳定分析的基础^[12-15]。目前, 电网拓扑结构分析方法主要有基于关联矩阵^[16-18]或基于邻接矩阵^[19-21]的方法、基于网络拓扑追踪的方法^[22-25]、基于面向对象技术的方法^[26-27]、基于图论的方法^[28-29]、面向间隔的拓扑分析法^[30]、基于残差的拓扑错误识别方法^[31-32]、基于最小信息损失状态

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377011)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51377011).

估计的拓扑错误识别方法^[33]以及基于潮流转移的拓扑错误识别方法^[34-36]等。上述方法在拓扑结构识别过程中或基于电网元件连接关系和开关状态信息,或需要进行状态估计、复杂的潮流计算,在电网实际运行过程中,状态频繁变化的开关占少数,且开关存在拒动、误动或检测错误的情况,状态估计与潮流计算方法将耗费大量的时间,影响电网拓扑识别效率。因此,迫切需要从新的角度来探索电网拓扑结构识别方法,为电网稳定运行提供保障。

针对传统基于开关信息和潮流计算方法存在的不足,为提高电网拓扑识别效率和准确性,简化传统复杂的拓扑识别模型,本文基于功率平衡原理,将复杂的电网拓扑识别问题转化为盒子与小球的全局最优组合问题,构建数学模型,采用免疫算法对该模型进行求解,引入电压损耗以克服电网拓扑结构不唯一现象。所提方法可以根据状态量测快速准确识别电网拓扑,为大电网计算分析提供基础。

1 电网拓扑结构识别数学模型

1.1 电网拓扑识别问题数学描述

目前,电网安全稳定分析、规划设计模式为:在已知电网拓扑结构的前提下进行计算,以得到电网状态信息,进而对电网进行分析与设计。随着广域量测技术的发展,上述信息均可通过量测获得。如果由电网拓扑结构得到电网信息属于因果关系,则由电网信息反推电网拓扑结构属于关联关系,如图1所示。区别于传统依靠开关信息识别电网拓扑结构的方法,本文方法基于广域量测的电网信息,快速重构、复现电网网络拓扑。

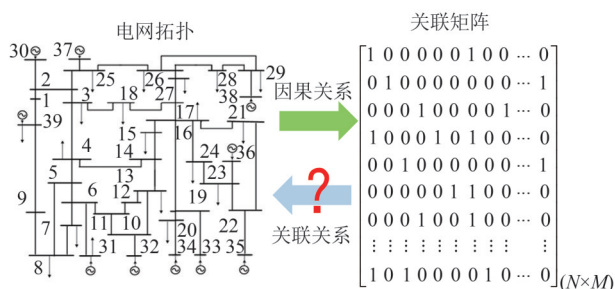


图1 电网拓扑结构识别问题

Fig. 1 Identification problem of power grid topology

1.2 电网拓扑识别问题优化方案

目前,在电网拓扑识别中主要应用潮流转移法,首先对电网进行状态评估,给出支路不良数据并修正当前的量测量,排除不良数据影响,然后计算扩展转移潮流。根据扩展转移潮流的线性相关关系识别拓扑错误;或通过拓扑错误可疑回路的相角差代数和检查来最终识别拓扑错误。该方法在电网拓扑识别中具有一定的价值,但在求解过程中需要对电网拓扑进行状态估计和潮流计算,将消耗大量时间,影响电网拓扑识别效率。

识别电网拓扑结构问题即为寻找电网母线节点与支路关联性问题,如果以母线为参考系,则其为寻找支路归属于哪个母线节点的问题。本文针对传统电网拓扑识别方法识别效率不高的问题,对电网拓扑识别问题进行数学抽象处理,将电网拓扑识别问题转化为寻优问题,以提高识别效率。因此,对电网进行如下映射处理:电网母线映射为盒子,发电机注入功率、负荷功率、支路两端流通功率分别映射为带数值小球,小球数值的正、负由功率流向决定。对某电网支路、发电节点、负荷节点、母线进行编号,即 k 条支路的端点(1, 2, $\dots$, $2k$), g 个发电节点($2k+1$, $2k+2$, $\dots$, $2k+g$), f 个负荷节点($2k+g+1$, $2k+g+2$, $\dots$, $2k+g+f$), M 条母线(1, 2, $\dots$, M),可得到 $2k+g+f$ 个带编号的小球和 M 个带编号的盒子。将电网拓扑结构识别问题转化为盒子与小球的归属问题,如图2所示。

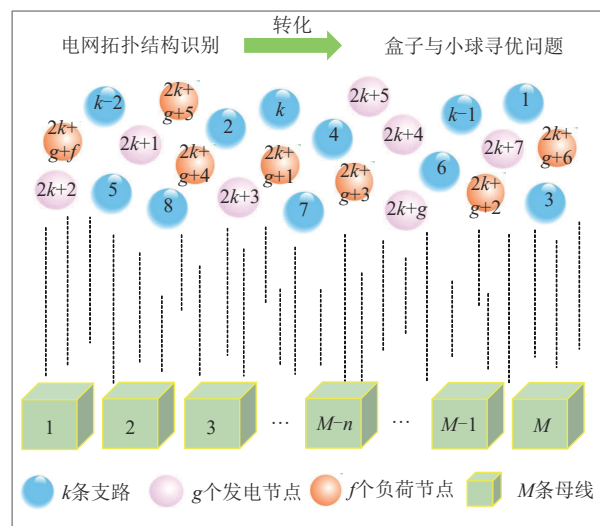


图2 电网拓扑结构问题转化

Fig. 2 Transformation of power grid topology problem

根据电网功率流通关系,每个母线节点功率均存在总流入等于总流出的平衡。映射到盒子与小球的归属问题上,即每个盒子中小球数值之和为零。由于不可避免地会出现量测误差,每个盒子中小球数值之和只能趋近于零。将电网拓扑结构识别问题转化为寻求每个盒子中小球数值之和绝对值最小,以及全网所有盒子绝对值总和最小的全局最优问题。通过对此问题进行求解,即可得到电网网络拓扑。

1.3 电网拓扑识别问题数学模型

1.3.1 目标函数

本文以每个盒子中小球数值之和绝对值最小且所有盒子绝对值总和最小为电网拓扑结构识别问题全局最优目标,其目标函数为

$$\min F = \sum_{i \in N} \text{abs} \left(\sum_{j \in H_i} X_i Y_{ij} \right) \quad (1)$$

式中: F 为所有盒子绝对值总和,即电网各母线节点功率之和绝对值的总和; N 为全部小球编号,即所有发电机注入功率、负荷消耗功率、支路两端流通功率的编号; H_i 为小球 i 的备选盒子集合,即母线集合, $i \in N$; X_i 表示小球 i 所带的数值,即功率值,由于输电线路及其两端支路均存在无功功率,节点平衡统计困难,而有功功率只存在于输电线路,较容易统计,因此本文在计算过程中取为有功功率; Y_{ij} 为 0-1 变量,表示小球 i 与盒子 j 的归属关系, $Y_{ij}=1$ 表示小球 i 属于盒子 j , $Y_{ij}=0$ 表示小球 i 不属于盒子 j 。

1.3.2 约束条件

约束条件如下:

$$\bar{Y} = [Y_{ij}]_{N \times M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{N \times M} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in H_i} Y_{ij} = 1, \quad i \in N \quad (3)$$

$$Y_{ij} + Y_{(i+1)j} \leq 1, \quad 1 < i < 2k-1, j \in H_i \quad (4)$$

$$Y_{ij} \leq q_j, \quad j \in H_i \quad (5)$$

$$\sum_{j \in H_i} q_j = M, \quad q_j \in \{0, 1\} \quad (6)$$

式中 q_j 为 0-1 变量, $q_j=1$ 表示点 j 被选为盒子。

式(3)确保每个小球只能被分配给一个盒子,即一个功率节点只能连接到一个母线节点上。式(4)保证了同一条支路上的小球不被分到同一个盒子,即同一条支路上的功率节点不能连接到同一个母线节点上。式(5)确保每个小球能被分配到每个盒子,即每个功率节点都会连接到母线上。式(6)规定了被选盒子数量为 M ,即电网的母线节点数量为 M 。

1.3.3 基于电压损耗的电网唯一拓扑识别

在利用免疫算法进行电网拓扑寻优过程中,可能会出现拓扑不唯一现象,如图3中 $a-d$ 连接或 $a-b$ 连接。针对该问题,本文引入电压损耗来确定电网唯一拓扑,电压损耗计算过程如图3所示。

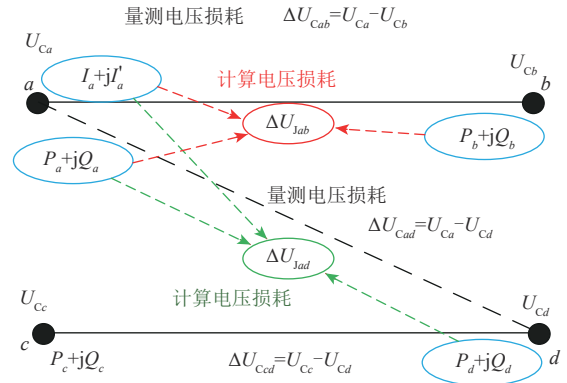


图3 基于电压损耗的拓扑结构不唯一问题求解

Fig. 3 Solution of topology non-uniqueness problem based on voltage loss

图3中: U_{Ca} 、 U_{Cb} 、 U_{Cc} 和 U_{Cd} 分别为节点 a 、 b 、 c 、 d 的量测电压; $P_a + jQ_a$ 、 $P_b + jQ_b$ 、 $P_c + jQ_c$ 、 $P_d + jQ_d$ 分别为节点 a 、 b 、 c 、 d 的量测功率; $I_a + jI'_a$ 为节点 a 的量测电流。基于上述信息,按照式(7)、(8)分别计算 $a-b$ 相连或 $a-d$ 相连时 2 种情况下线路计算电压损耗 ΔU_{Jab} 、 ΔU_{Jad} 和量测电压损耗 ΔU_{Cab} 、 ΔU_{Cad} 。

$$\begin{cases} \Delta U_{Jab} = \frac{(P_a - P_b) + j(Q_a - Q_b)}{(I_a + jI'_a)'} \\ \Delta U_{Jad} = \frac{(P_a - P_d) + j(Q_a - Q_d)}{(I_a + jI'_a)'} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \Delta U_{Cab} = U_{Ca} - U_{Cb} \\ \Delta U_{Cad} = U_{Ca} - U_{Cd} \end{cases} \quad (8)$$

1) 当 $a-b$ 为正确连接拓扑, $a-d$ 为错误连接拓扑时, $\Delta U_{Jab} = \Delta U_{Cab}$, 而 $\Delta U_{Jad} \neq \Delta U_{Cad}$ 。

2) 当 $a-d$ 为正确连接拓扑, $a-b$ 为错误连接拓扑时, $\Delta U_{lad} = \Delta U_{Cad}$, 而 $\Delta U_{lab} \neq \Delta U_{Cab}$ 。

2 电网拓扑结构识别的免疫算法

在构建电网拓扑识别数学模型后, 需要借助智能算法对其进行寻优求解。免疫算法模仿生物免疫机制^[37-42], 采用群体搜索策略, 通过迭代计算可以实现对全局的寻优, 与其他寻优算法相比, 免疫算法利用自身产生的多样性和免疫机制, 保证了种群的多样性, 克服了一般寻优过程(特别是多峰值的寻优过程)中不可避免的“早熟”问题, 可以较好地给出全局最优解。因此, 本文采用免疫算法对电网拓扑结构识别问题进行求解。

免疫算法通过群体搜索策略和个体间信息交换来实现对复杂问题的快速寻优, 电网拓扑结构识别免疫算法需经过如下循环: 1) 初始种群产生, 对所有发电、负荷、支路节点(以下称为“节点”)进行初步的归类, 即拓扑结构识别模型中若干组盒子序列; 2) 评价标准计算, 归类后对每类所包含的节点分别进行计算, 即计算每个盒子的数值, 并对该组盒子序列进行评价; 3) 种群间个体信息交换, 根据上述评价结果, 挑选出最优的一组盒子序列, 并对该组中绝对值较大的盒子进行信息交换, 即对归类不合理的节点重新进行优化调整, 保留该序列; 4) 新种群产生, 再次产生若干组节点归类序列, 以较大概率获得电网节点的正确归类。

2.1 拓扑结构识别免疫算法初始种群产生

进一步将问题简化为: 将 N 个小球(发电机注入功率、负荷功率、支路两端流通功率)分配给 M 个盒子(母线), 且每个小球只对应一个盒子, 即每个节点只能连接一类母线。以小球为参考, 按 N 个小球的顺序进行排列, 可对应得到 M 个盒子的排列, 该排列即为电网拓扑结构识别的一个可行解, 如图4所示。

2.2 拓扑结构识别免疫算法可行解评价

2.2.1 母线序列与小球间亲和力

由目标函数 F 可以得到母线序列对小球(即发电机注入功率、负荷功率、支路两端流通功率节点序列)的识别程度, 可用式(9)所示的亲和力函数

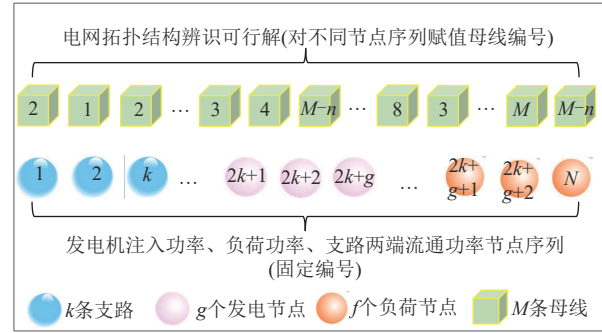


图4 电网拓扑结构识别可行解

Fig. 4 Feasible solution of network topology identification

f_w 表示:

$$f_w = \frac{1}{F} = \frac{1}{\sum_{i \in N} \text{abs}(\sum_{j \in H_i} X_i Y_{ij})} \quad (9)$$

所有盒子绝对值总和越小, 即母线节点所有注入功率与流出功率之和越小, 可行解与系统目标越接近, 当形成正确的电网拓扑时, 电网所有节点功率平衡, 该目标函数值理论上为零。

2.2.2 母线序列组间的亲和力

母线排列顺序组之间的相似度可用亲和力函数 $U_{w,u}$ 表示:

$$U_{w,u} = \frac{p_{w,u}}{L} \quad (10)$$

式中: $p_{w,u}$ 为母线序列 w 、 u 中母线编号相同的个数; L 为母线序列长度。

利用 Forrest 等提出的 R 位连续方法^[40], 通过确定阈值 R 来判断, 即若 2 组母线序列有超过 R 个或连续 R 个编号重合时, 则表示这 2 组母线序列近似相同; 否则, 这 2 组母线序列不同。例如, 2 组母线序列分别为 $\{3, 4, 39, 21, 29, 2, 9, 34\}$, $\{1, 4, 32, 25, 21, 9, 34, 30\}$, 经比较, 这 2 组母线中有 4 个值相同, 由式(10)可知, 2 组母线序列间亲和力为 0.5。

2.2.3 母线序列浓度

群体中与母线序列 w 相似的母线序列占比用抗体浓度 C_w 表示:

$$C_w = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N U_{w,u} \quad (11)$$

$$U_{w,u} = \begin{cases} 1, & U_{w,u} > T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中 T 为预先设置的阈值。

2.2.4 期望繁殖概率

单个电网拓扑结构辨识可行解期望繁殖率 Q_w 表示为

$$Q_w = \alpha \frac{f_w}{\sum f_w} + (1 - \alpha) \frac{C_w}{\sum C_w} \quad (13)$$

式中 α 为常数。

由式(13)可知, Q_w 主要与母线序列与小球间亲和力函数 f_w 、抗体浓度 C_w 有关。进一步将式(9)–(12)代入式(13), 可得

$$Q_w = \alpha \left[\sum_{i \in N} \left(\frac{1}{\sum_{j \in H_i} \text{abs}(\sum X_i Y_{ij})} \right) \sum_{i \in N} \text{abs}(\sum_{j \in H_i} X_i Y_{ij}) \right] + (1 - \alpha) \sum_{u=1}^N U_{w,u} / \left[N \sum_{u=1}^N U_{w,u} \right] \quad (14)$$

式(14)物理意义为: 母线序列的亲和力越大、浓度越大, 则期望繁殖率也越大。这样既鼓励了亲和力大的母线序列组, 又抑制了浓度高的母线序列组, 从而确保了母线序列组的多样性。

2.3 拓扑结构识别免疫算法记忆库更新

在抑制高浓度母线序列时, 免疫算法可能使与小球亲和度最高的母线序列受到抑制, 丢失最优解。本文算法采用先将与小球亲和度最高的前 b_1 个母线序列存入记忆库, 再根据期望繁殖率高低将前 b_2 个母线序列存入记忆库的精英保留策略; 之后每次循环均采用精英保留策略, 并将得到的 $b_1 + b_2$ 个母线序列与记忆库中的母线序列进行对比替换, 保留精英; 循环结束后, 取记忆库中亲和度最高的母线序列作为最优可行解。

2.4 拓扑结构识别免疫操作

1) 母线序列选择。由期望繁殖概率函数和赌轮盘机制进行选择, 将每代中最优母线序列保留至下一代, 保证一代比一代好。

2) 母线序列交叉。基于免疫算法的电网拓扑结构识别模型采用单点交叉法, 在算法中加入约束条件, 保证了母线序列交叉操作的有效性。

3) 母线序列变异。选择变异方向, 在母线序列中选择绝对值较大母线进行变异, 若某条母线绝对值为零, 则该母线变异可能性最低。

2.5 拓扑结构识别免疫算法流程

基于免疫优化算法的电网拓扑结构识别求解流程如图5所示。具体实现步骤如下:

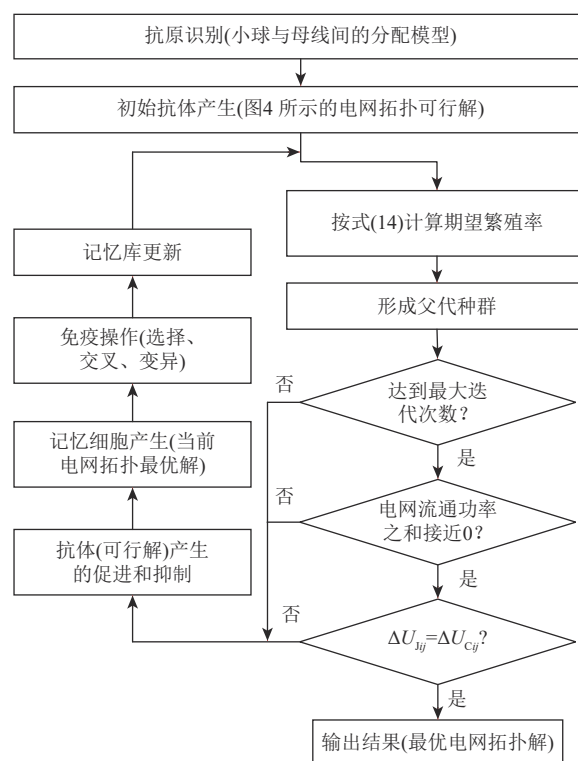


图5 免疫优化算法流程图

Fig. 5 Flowchart of immune optimization algorithm

1) 分析问题, 给出抗原。本模型中抗原为 N 个小球与 M 条母线的关联关系或归属关系, 用目标函数和约束条件表示。

2) 产生初始抗体群。随机产生 n 个长度为 N 的母线序列, 从记忆库中取出 m 个母线序列形成初始群体。

3) 评价群体中的母线序列。算法通过式(14)所示的期望繁殖率评价母线序列。

4) 形成父代种群。按照期望繁殖率对初始母线序列组进行降序排列, 将前 n 个母线序列作为父代群体, 并将前 m 个母线序列存入记忆库。

5) 判断是否达到最大迭代次数, 若达到, 则计算电网流通总功率之和是否接近于 0, 若接近于 0, 则根据式(7)、(8)进一步计算电网各节点 i 、 j 的计算电压损耗 ΔU_{ij} 与量测电压损耗 ΔU_{cij} 是否相等, 若相等, 则输出最优解; 反之, 则继续进行下一步操作。

6) 新群体的产生。根据步骤4) 结果, 对母线序列组进行选择、变异、交叉等操作, 形成新的母线序列组, 再从记忆库中取出记忆母线序列,

共同构成新一代群体，返回步骤3)。

当电网规模较大时，为提高电网拓扑识别效率，基于电压等级、地理区域对电网进行分区处理，得到电网不同区域潮流数据，基于本文所提算法，分别对不同区域电网拓扑进行寻优，同时识别不同区域电网拓扑，最后整合不同区域电网识别结果，实现对大规模电网拓扑的识别。

3 算例分析

3.1 算例场景

以IEEE 39节点系统为场景，对本文免疫算法进行仿真分析。图6为IEEE 39节点系统拓扑结构。首先，对其支路和节点分别进行编号：46条支路两端编号为1—92；10个发电机节点编号为93—102；17个负荷节点编号为103—119。其次，将119个带编号的节点映射为119个带数值小球，小球数值大小即为对应节点有功功率，取功率流入母线为正，流出母线为负。最后，将39条母线编号为1—39，39条母线映射为39个盒子。

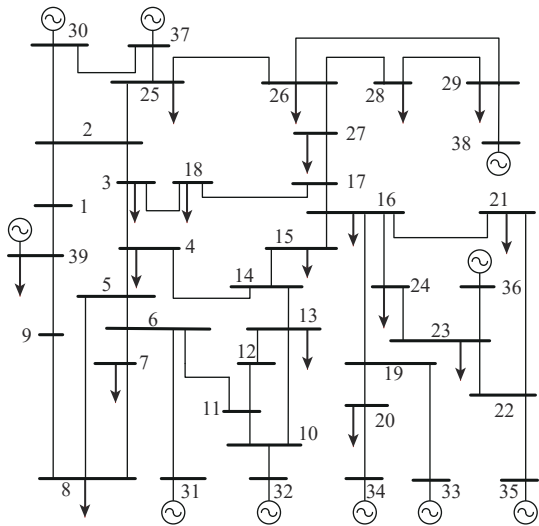


图6 IEEE 39节点系统拓扑结构
Fig. 6 Topology of IEEE 39 node system

3.2 电网拓扑结构识别分析

基于免疫算法，对IEEE 39节点系统拓扑结构进行识别，取抗体长度为119，种群进化代数数为1 000，种群规模为50，记忆库容量为10，交叉概率为0.85，变异概率为0.1，期望繁殖率取0.8，初始种群是对所有节点遍历产生的。表1给出了

39条母线和各节点的关联关系，即母线编号后的节点应连接在该条母线上。通过对比计算结果与IEEE 39节点系统拓扑信息可知二者一致，表明了该识别结果的正确性。

表1 电网拓扑结构识别计算结果
Tab. 1 Calculation results of power grid topology identification

母线	归属母线的小球编号	母线	归属母线的小球编号
1	1 3	21	46 53 112
2	2 5 7 87	22	54 55 81
3	6 9 11 103	23	56 57 83 113
4	10 13 15 104	24	48 58 114
5	14 17 19	25	8 59 85 115
6	18 21 23 73	26	60 61 63 65 116
7	22 25 105	27	52 62 117
8	20 26 27 106	28	64 67 118
9	28 29	29	66 68 89 119
10	31 33 75	30	88 93
11	24 32 70	31	74 94
12	69 71 107	32	76 95
13	34 35 72	33	78 96
14	16 36 37	34	80 97
15	38 39 108	35	82 98
16	40 41 43 45 47 109	36	84 99
17	42 49 51	37	86 100
18	12 50 110	38	90 101
19	44 77 91	39	4 30 102
20	79 92 111		

在免疫算法给出最优解(盒子序列)后，如何将电网拓扑结果快速、直观、形象地呈现出来，以方便从拓扑结构上对电网进行研究，是急需解决的重要问题。本文首先对图6中IEEE 39节点系统进行简化，将母线看作点，利用可伸缩矢量图(scalable vector graphics, SVG)技术得到39节点系统SVG图，如图7所示。图7中横、纵坐标均为缩放距离，本文假设实际距离与缩放距离的比例为100 000 : 1，在实际应用中，该比例可根据实际情况自定义调整。

将图7中支路、节点分开，输出各节点、支路端点坐标，由MATLAB得到电网拓扑结构底图，如图8所示。将免疫算法结果输入到图8中，并将拓扑结构与原SVG图进行对比，可直观、快速判断电网拓扑结构识别准确性。

IEEE 39节点系统拓扑结构识别结果如图9所

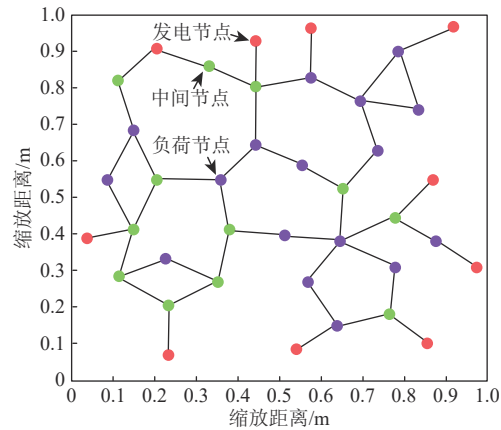


图7 IEEE 39节点系统SVG图
Fig. 7 SVG figure of IEEE 39 node power system

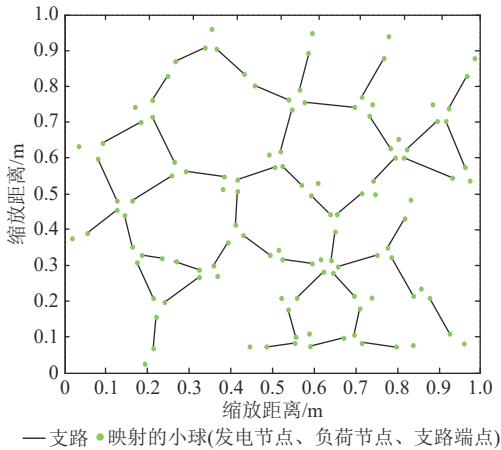


图8 IEEE 39节点系统底图
Fig. 8 Base map of IEEE 39 node power system

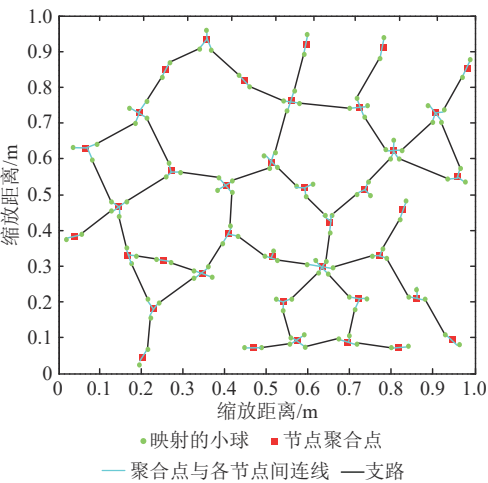


图9 IEEE 39节点系统拓扑结构识别结果
Fig. 9 Topology identification results of IEEE 39 node power system

示。如果节点均连在一个聚合点上，则表示这些节点被分配到了一个盒子里，即这些节点在电网

中属于同一个母线节点。通过对比识别拓扑图与原SVG图可知，二者拓扑结构一致，验证了本文方法的正确性。

在实际电网中，基于广域时空信息得到电网拓扑结构后，为了验证拓扑结构的正确性，可以通过母线量测电压和支路流通功率，结合识别得到的电网拓扑结构进行支路电流计算。若所得各支路电流与量测电流一致，则拓扑结构识别正确；否则，改变时间序列点，重新进行拓扑结构识别分析。

3.3 电网唯一拓扑结构确定

在利用免疫算法识别电网拓扑结构过程中，有时不可避免地会出现部分节点连接错误，导致最终识别的电网拓扑结构不唯一，如图10所示。为了将图10中正确的拓扑1(a-b, c-d拓扑结果)识别出来，需先采集节点a、b、c、d的量测信息，如表2所示。

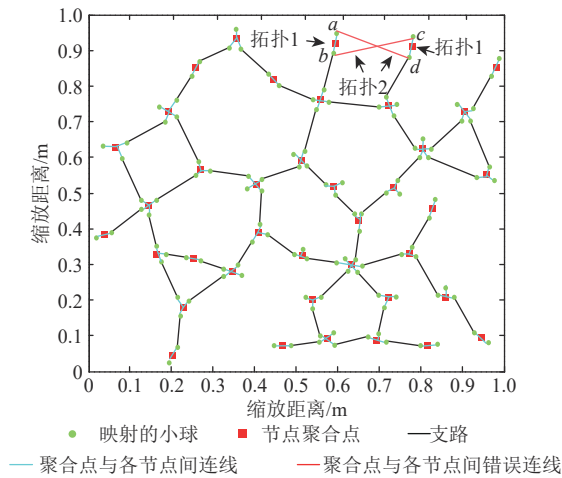


图10 电网拓扑结构不唯一现象
Fig. 10 Non-unique phenomenon of power grid topology

表2 各节点量测数据

参数	节点			
	a	b	c	d
功率	16.16+13.36j	14.23+13.13j	14.24+15.3j	13.25+12.85j
电流	0.13-0.11j	0.13-0.11j	0.13-0.13j	0.13-0.13j
电压	109.21+7.26j	99.68+13.55j	110.3+6.4j	102+6.85j

根据式(7)、(8)分别计算2种拓扑结构下的量测电压损耗、计算电压损耗，结果如表3所示。可以看出， $\Delta U_{lab} = \Delta U_{cab}$ ， $\Delta U_{lad} \neq \Delta U_{cad}$ ，由此可知，拓扑1为正确识别结果。

表3 电压损耗计算结果

Tab. 3 Calculation results of voltage loss

电压损耗	ΔU_{Cab}	ΔU_{Cad}	ΔU_{Jab}	ΔU_{Jad}
计算结果	9.53-6.29j	7.21+0.41j	9.53-6.29j	14.98-8.75j

3.4 拓扑识别有效性对比分析

为了验证本文方法在全局寻优上的优越性，选取了经典的基于潮流转移的拓扑错误识别方法^[34-36]进行仿真对比分析，利用本文所提组合优化数学模型，对 IEEE 39 节点系统和 IEEE 118 节点系统的拓扑结构进行识别，记录最终取得反演拓扑结构所需时间，如表4所示。

表4 电网拓扑识别效率对比

Tab. 4 Comparison of power grid topology identification efficiency

方法	全局寻优时间/s	
	IEEE 39节点系统	IEEE 118节点系统
本文方法	10	26
潮流转移法	30	48

由表4可知，本文方法在 IEEE39 节点、IEEE118 节点系统上的全局寻优时间分别为10、26 s，而潮流转移法所需时间更长，这主要是由于潮流计算、状态估计耗时较长^[33-36]。本文方法充分利用潮流约束规律，借助智能算法对构建的拓扑识别模型进行求解，提高了电网拓扑识别效率。

4 结论

基于广域时空量测信息，结合电网潮流规律，将电网拓扑结构识别问题转化为带数值小球与盒子的组合寻优问题，提出基于免疫算法的电网拓扑结构识别方法。具体结论如下：

1) 与传统电网拓扑结构识别方法相比，所提方法从寻优的角度识别电网拓扑，简化了电网拓扑识别流程和复杂度，提高了识别效率；引入计算电压损耗，克服了电网拓扑结构识别解不唯一问题，能有效识别出正确电网拓扑。

2) 利用免疫算法对电网拓扑结构识别这一全局寻优问题进行求解，避免陷入局部早熟问题，提高了电网多拓扑寻优搜索效率，能快速得到全局最优可行解。

3) 研究思路和方法可为基于广域时空信息的

大电网时空动力学特性精准把握和广域协调优化控制提供参考，具有较大的工程实用价值。

参考文献

[1] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904.
ZHOU X X, CHEN S S, LU Z X, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.

[2] 陈树勇, 常晓鹏, 孙华东, 等. 风电场接入对电力系统阻尼特性的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1570-1577.
CHEN S Y, CHANG X P, SUN H D, et al. Impact of grid-connected wind farm on damping performance of power system[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1570-1577.

[3] 马钊, 张恒旭, 赵浩然, 等. 双碳目标下配用电系统的新使命和新挑战[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 6931-6945.
MA Z, ZHANG H X, ZHAO H R, et al. New mission and challenge of power distribution and consumption system under dual-carbon target[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6931-6945.

[4] 王之伟, 黄俊辉, 程亮, 等. “嵌入式”直流技术在省级输电网中的规划及应用[J]. 电力工程技术, 2022, 41(6): 65-74.
WANG Z W, HUANG J H, CHENG L, et al. Planning and application of embedded DC transmission technology in the provincial transmission power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 65-74.

[5] 刘泽扬, 荆朝霞. 美国德州2·15停电初步分析及其对我国电力市场建设的启示[J]. 发电技术, 2021, 42(1): 131-139.
LIU Z Y, JING Z X. Preliminary analysis of the 2·15 power outage in Texas, U.S. and its enlightenment to the construction of China's electricity market[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 131-139.

[6] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架(二)广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 1-10.
XUE Y S. Space-time cooperative framework for defending blackouts: part II : reliable information, quantitative analyses and adaptive controls[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2):

- 1-10.
- [7] 周毅, 黄森, 石少伟, 等. 基于分群结构优化的储能配置规划[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(11): 126-133.
- ZHOU Y, HUANG S, SHI S W, et al. Optimal planning of energy storage based on site selection of cluster structure optimization[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11): 126-133.
- [8] 李宁波, 闫涛, 李乃鹏, 等. 基于SCADA数据的风机叶片结冰检测方法[J]. 发电技术, 2018, 39(1): 58-62.
- LI N B, YAN T, LI N P, et al. Ice detection method by using SCADA data on wind turbine blades[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(1): 58-62.
- [9] AGNIHOTRI P, KULKARNI A M, GOLE A M, et al. A robust wide-area measurement-based damping controller for networks with embedded multiterminal and multiinfeed HVDC links[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3884-3892.
- [10] 杨胜春, 汤必强, 姚建国, 等. 基于态势感知的电网自动智能调度架构及关键技术[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 33-39.
- YANG S C, TANG B Q, YAO J G, et al. Architecture and key technologies for situational awareness based automatic intelligent dispatching of power grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 33-39.
- [11] 刘道伟, 张东霞, 孙华东, 等. 时空大数据环境下的大电网稳定态势量化评估与自适应防控体系构建[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 268-276.
- LIU D W, ZHANG D X, SUN H D, et al. Construction of stability situation quantitative assessment and adaptive control system for large-scale power grid in the spatiotemporal big data environment [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 268-276.
- [12] 杨贵云, 吴倩, 曹彦昆, 等. 基于分层布局思想的配电网拓扑图自动生成算法[J]. 发电技术, 2021, 42(5): 585-594.
- YANG G Y, WU Q, CAO Y K, et al. Automatic generation algorithm of distribution network topology based on hierarchical layout[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(5): 585-594.
- [13] 刘家庆, 徐峥. 大电网运行控制面临的形势、问题与挑战[J]. 发电技术, 2018, 39(6): 493-498.
- LIU J Q, XU Z. The situation, problems and challenges of large power grid operation and control[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(6): 493-498.
- [14] 刘艳, 顾雪平. 基于节点重要度评价的骨架网络重构[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 20-27.
- LIU Y, GU X P. Node importance assessment based skeleton network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 20-27.
- [15] 林攀, 吴佳毅, 黄涛, 等. 电力系统脆弱性评估综述[J]. 智慧电力, 2021, 49(1): 22-28.
- LIN P, WU J Y, HUANG T, et al. Overview of vulnerability assessment for power systems[J]. Smart Power, 2021, 49(1): 22-28.
- [16] 王湘中, 黎晓兰. 基于关联矩阵的电网拓扑辨识[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 10-16.
- WANG X Z, LI X L. Topology identification of power network based on incidence matrix[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 10-16.
- [17] 马静, 张侯好, 马伟, 等. 基于关联矩阵标记法与回路矩阵的电网拓扑分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 74-80.
- MA J, ZHANG Y Y, MA W, et al. Power network topological analysis based on incidence matrix notation method and loop matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 74-80.
- [18] 华健, 韩学山, 王锦旗, 等. 改进高斯消元算法在电力系统拓扑结构分析中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(23): 57-61.
- HUA J, HAN X S, WANG J Q, et al. Application of improved gaussian elimination algorithm in power system topology analysis[J]. Power System Technology, 2007, 31(23): 57-61.
- [19] ZHU Y L, SIDHU T S, YANG M Y, et al. An AI-based automatic network topology processor[J]. Electric Power Systems Research, 2002, 61(1): 57-65.
- [20] BUTLER P K L, SARMA N D R. Self-healing reconfiguration for restoration of naval shipboard power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 754-762.
- [21] GODERYA F, METWALLY A A, MANSOUR O. Fast detection and identification of islands in power networks[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(1): 217-221.
- [22] 徐岩, 宋艳争, 张亚刚, 等. 基于广域测量系统的改进电网拓扑结构识别[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 88-93.
- XU Y, SONG Y Z, ZHANG Y G, et al. An improved method for power network topology identification based on wide area measurement system [J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 88-93.
- [23] PHONGSAK D Y, DABBAGHCHI I. A topology-

- based algorithm for tracking network connectivity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 339-345.
- [24] 宋少群, 朱永利, 于红. 基于图论与人工智能搜索技术的电网拓扑跟踪方法[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 45-49.
- SONG S Q, ZHU Y L, YU H. A power network topology tracking method based on graph theory and artificial intelligence search technique[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 45-49.
- [25] 屈志坚, 刘明光, 李娜, 等. 环形拓扑快速追踪优化算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 43-47.
- QU Z J, LIU M G, LI N, et al. Modeling of wind speed uncertainty and interval power flow analysis for wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 43-47.
- [26] 廖卫列, 刘军, 于海玉. 基于地理信息系统的配电网网络拓扑分析及其应用[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 85-88.
- LIAO W L, LIU J, YU H Y. Distribution network topological analysis and apply based on GIS platform[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 85-88.
- [27] 龙启峰, 陈岗, 丁晓群, 等. 基于面向对象技术的电力网络拓扑分析新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(1): 73-77.
- LONG Q F, CHEN G, DIN X Q. New method of power network topology analysis based on object-oriented technology[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(1): 73-77.
- [28] 吴文传, 张伯明. 基于图形数据库的网络拓扑及其应用[J]. 电网技术, 2002, 26(2): 14-18.
- WU W C, ZHANG B M. A graphic database based network topology and its application[J]. Power System Technology, 2002, 26(2): 14-18.
- [29] 梅念, 石东源, 段献忠. 基于图论的电网拓扑快速形成与局部修正新方法[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 35-39.
- MEI N, SHI D Y, DUAN X Z. A novel method for fast power network topology formation and partial revision based on graph theory[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 35-39.
- [30] 韩国政, 邱洪泽. 面向间隔的电力网络拓扑分析方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 59-63.
- HAN G Z, QIU H Z. Bay-oriented power system network topology analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 59-63.
- [31] 陈艳波, 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 197-251.
- CHEN Y B, YU E K. Power system state estimation [M]. Beijing: Science Press, 2021: 197-251.
- [32] 陈艳波. 电网拓扑错误辨识研究[M]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010: 11-58.
- CHEN Y B. Research on identification of power grid topology errors[M]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2010: 11-58.
- [33] 孙宏斌, 高峰, 张伯明, 等. 最小信息损失状态估计在拓扑错误辨识中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 1-5.
- SUN H B, GAO F, ZHANG B M, et al. Application of minimum information loss based state estimation to topology error identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 1-5.
- [34] 陈艳波, 何光宇, 周京阳, 等. 基于改进转移潮流法的拓扑错误辨识方法[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 95-100.
- CHEN Y B, HE G Y, ZHOU J Y, et al. An improved power flow transfer approach with enhanced ability to identify topology error and bad data[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 95-100.
- [35] 陈艳波, 周京阳, 于尔铿, 等. 转移潮流法拓扑错误辨识[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 20-24.
- CHEN Y B, ZHOU J Y, YU E K, et al. Transfer power flow approach to topology error identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 20-24.
- [36] 陈艳波, 周京阳, 于尔铿, 等. 基于转移潮流的状态估计模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 39-42.
- CHEN Y B, ZHOU J Y, YU E K, et al. A transfer power flow based state estimation model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 39-42.
- [37] 刘道伟, 章锐, 李柏青, 等. 基于状态量测的电网拓扑结构反向识别方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7107-7117.
- LIU D W, ZHANG R, LI B Q, et al. Research on reverse recognition method of power system topological structure based on state measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7107-7117.
- [38] 李樊, 刘天琪, 江东林. 采用改进免疫算法的多目标配电网重构[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 134-138.
- LI F, LIU T Q, JIANG D L. Distribution network reconfiguration with multi-objective based on improved immune algorithm[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 134-138.
- [39] 蒙文川, 邱家驹. 基于免疫算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 25-29.

- MENG W C, QIU J J. An artificial immune algorithm to distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 26(17): 25-29.
- [40] 杨秀霞, 张晓锋, 张毅蒙. 免疫遗传算法在舰船电力系统供电恢复中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 80-85.
- YANG X X, ZHANG X F, ZHANG Y M. Study on immune genetic algorithm for shipboard power system service restoration[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 80-85.
- [41] 项颂, 万玉良, 张超明, 等. 基于附加电流指令的抑制多馈入直流系统相继换相失败渐进恢复策略[J]. 电力建设, 2021, 42(2): 20-26.
- XIANG S, WAN Y L, ZHANG C M, et al. Incremental recovery strategy based on additional current order to suppress the successive commutation failure of multi-infeed dc system[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(2): 20-26.
- [42] CHEN L, LU J A, TES C K. Synchronization: an obstacle to Identification of network topology[J]. IEEE

Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs, 2009, 56(4): 310-314.

收稿日期: 2022-05-30。

作者简介:



董宸

董宸(1982), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制、微电网优化配置及控制, dongchen@sungrowpower.com;



杨秀媛

杨秀媛(1962), 女, 硕士, 教授, 研究方向为含新能源的电力系统分析与规划, 本文通信作者, yangxy0912@163.com。

(责任编辑 尚彩娟)