

DOI: 10.7667/PSPC170790

基于图谱理论的电力系统关键节点识别方法

栗然¹, 靳保源², 张凡¹, 范航¹, 段秦刚³

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 国网冀北张家口供电公司, 河北 张家口 075000;
3. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600)

摘要: 引入图谱理论从数学角度建立了电力系统网络拓扑图的有效电阻矩阵, 并基于有效电阻矩阵提出了节点耦合关键度指标。通过对节点耦合关键度累积概率分布进行分析, 验证了电力系统的无标度特性, 进而将节点耦合关键度用于电力系统关键节点的识别。该指标不仅满足基尔霍夫定律, 也能表明节点相角与节点功率的定量关系, 其物理意义更加符合实际电力系统。另外, 通过容量生存率、负荷生存率、线路生存率和综合生存率4个指标来描述节点发生全故障对电力系统造成的影响。最后, 对IEEE-39节点算例的仿真验证表明, 基于有效电阻矩阵得到的节点耦合关键度指标对处于系统拓扑结构中关键位置的节点有一定识别作用, 能为电力系统的安全稳定运行提供指导。

关键词: 电力系统; 关键节点; 节点耦合关键度; 图谱理论; 拉普拉斯矩阵

Research on identification of key nodes in power system based on spectral graph theory

LI Ran¹, JIN Baoyuan², ZHANG Fan¹, FAN Hang¹, DUAN Qingang³

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. State Grid Zhangjiakou Power Supply Company, Zhangjiakou 075000, China;
3. Power Dispatching Control Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd, Guangzhou 510600, China)

Abstract: The spectral graph theory is introduced to establish the effective resistance matrix of power system network topology from the mathematical point of view, and the index of nodal coupling degree is put forward based on the effective resistance matrix. By analyzing the cumulative probability distribution of node coupling degree, the scale-free characteristic of power system is verified. Then the index is applied to identification of the key nodes in actual power system. The index not only satisfies the Kirchhoff's law, but also can show the quantitative relationship between nodal phase angle and nodal power, meanwhile, its physical meaning is more consistent with actual power system. In addition, the capacity survivability index, load survivability index, line survivability index and synthetical survivability index are adopted to describe the effects of failure of the nodes on power system. Finally, the simulation verification of IEEE-39 bus system is done, which shows that the index of nodal coupling degree has a certain recognition to the nodes in the key position of the system topology, so it can provide guidance for the safe and stable operation of actual power system.

This work is supported by Power System Planning Subject of Power Dispatch and Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd. (No. 036000QQ00150002).

Key words: power system; key nodes; nodal coupling degree; spectral graph theory; Laplacian matrix

0 引言

随着智能电网在电力系统各领域不断完善和投入使用, 电力系统的复杂性不断提高。同时, 电力市场不断融入电力系统, 也给电力系统的安全稳定

运行带来了巨大挑战。因此, 维持电力系统安全稳定运行已经不能再单纯依靠电力系统安全评估^[1]。而关键环节的辨识为维护系统安全稳定运行提供了新思路, 通过对关键环节进行重点保护, 可以有效降低网络运行风险, 提高网络的抗毁性^[2-3]。

目前, 电力系统普遍采用图论和复杂网络理论对网络特征进行分析, 通过对网络拓扑结构的研究来分析电力系统的故障传播机理。研究表明, 电力

基金项目: 广东电网有限责任公司电力调度控制中心电力系统规划专题(036000QQ00150002)

系统具有小世界网络的明显特征^[4-6], 网络中的 Hub 节点(或线路)故障后对系统故障的扩散有推波助澜的作用。因此, 寻找对系统稳定运行影响较大的节点(或线路)具有重要意义。介数^[7-8]、度^[9]等复杂网络理论中的基本指标被率先运用于电力系统关键环节的识别中, 并通过这些指标对系统连锁故障发展过程进行分析; 文献[10]采用主客观权重系数对复杂网络理论中的传统识别指标加权得到节点的综合判别指标。但直接运用上述指标未能将电力系统的拓扑结构及其电气特征有效结合, 更重要的是没有结合基尔霍夫定律。针对这些问题, 文献[11]基于电路方程提出了电气介数, 并将其运用于关键线路识别; 文献[12]综合考虑网络拓扑结构和系统运行状态, 提出了综合介数指标并应用于关键线路识别; 文献[13]认为线路电压等级是线路关键性的重要考量指标, 提出了采用电压求和作为节点度对网络拓扑熵进行加权的方法; 文献[14]引入熵理论, 提出了熵度的概念, 并用于识别线路关键程度的指标中; 文献[15]基于潮流追踪算法, 引入 PageRank 算法, 建立了节点重要度评价模型, 使识别结果更加具有说服力。

上述文献提出的指标或模型结合了部分电气量, 所得结果也能在一定程度上反映线路或节点在网络中的重要程度, 但仅依靠网络传输线的连接情况建立网络拓扑模型, 不能有效反映出网络的耦合程度^[16]。文献[16]从电气学的角度出发, 根据 Thevenin 等效定理构建了新的网络拓扑模型, 并根据度的概念提出了电气耦合连接度, 证明了电力网络具有异质性。但文中所提指标也只是结合了系统阻抗矩阵的相关信息, 且缺乏相应的数学基础, 所得结果有待进一步验证。

本文将图谱理论应用于电力系统关键节点识别, 从网络拓扑结构入手, 依据数学理论推导得到系统的拉普拉斯矩阵, 通过对拉普拉斯矩阵进行谱分解, 得到了系统的有效电阻矩阵, 并基于有效电阻矩阵定义了节点的耦合关键度指标, 该指标有效结合了系统支路阻抗的相关信息, 同时融合了节点相角与功率的定量关系, 能够很好地切合电力系统的运行背景。此外, 通过对节点耦合关键度累积概率分布进行分析, 验证了电力系统的无标度特性。最后, 对 IEEE-39 节点进行仿真和分析, 验证了本文所提方法的合理性。

1 有效电阻

1.1 图谱理论

图谱理论是代数图论的重要研究方向, 将图论

与矩阵理论组合起来, 通过研究图的表示矩阵, 如邻接矩阵、拉普拉斯矩阵等来构建图的拓扑结构, 然后运用矩阵理论来研究网络拓扑结构的表示矩阵, 从而得到网络拓扑结构的深层属性^[17]。在复杂网络理论研究中, 也有大量运用图谱理论研究复杂网络模型的先例, 例如对 ER 模型、WS 小世界网络模型等谱半径的研究等^[18], 图谱理论为运用图论分析复杂网络提供了新方法。

1.2 电力网络的拉普拉斯矩阵

拉普拉斯矩阵是图谱理论中描述拓扑图特征的重要形式, 根据图论中的邻接矩阵和直流潮流计算公式得到节点 i 的注入功率为

$$P_i = \theta_i \sum_{j=1}^N a_{ij} b_{ij} - \sum_{j=1}^N a_{ij} b_{ij} \theta_j \quad (1)$$

式中: P_i 表示节点 i 的注入功率; b_{ij} 表示节点 i 和 j 之间电抗的倒数; a_{ij} 表示邻接矩阵中第 i 行第 j 列的元素; θ_i 和 θ_j 分别表示节点 i 和 j 的相角; N 表示系统中节点总数。

进而, 电力系统各节点注入功率可由式(1)得到如式(2)的计算公式。

$$\mathbf{P} = \left\{ \text{diag} \left(\sum_{j=1}^N w_{ij} \right) - \mathbf{W} \right\} \boldsymbol{\theta} = (\mathbf{D} - \mathbf{W}) \boldsymbol{\theta} \quad (2)$$

式中: $w_{ij} = a_{ij} b_{ij}$; $\mathbf{P} = [P_1 \cdots P_N]^T$ 为各节点注入功率相量; $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \cdots \theta_N]^T$ 为各节点的相角相量。从而引入了拉普拉斯矩阵 $\tilde{\mathbf{Q}} = \mathbf{D} - \mathbf{W}$, 根据上式, 可以得到拉普拉斯矩阵计算方式为

$$\tilde{\mathbf{Q}} = \begin{cases} -w_{ij} & i \neq j \\ \sum_{j=1}^N w_{ij} & i = j \end{cases} \quad (3)$$

从式(3)中可以看出, 系统拉普拉斯矩阵 $\tilde{\mathbf{Q}}$ 是实对称矩阵, 同时该矩阵的特征值非负^[19]。由于该矩阵的最小特征值为 0, 因此, 该矩阵不存在逆矩阵。但根据矩阵理论的相关知识, 任何一个实对称矩阵必存在正交矩阵可以将其对角化, 而对角矩阵恰好是实对称矩阵的特征值, 因此, 拉普拉斯矩阵 $\tilde{\mathbf{Q}}$ 可以写成式(4)。

$$\tilde{\mathbf{Q}} = \mathbf{X} \mathbf{A} \mathbf{X}^T \quad (4)$$

式中: \mathbf{X} 是正交矩阵; \mathbf{A} 为由 $\tilde{\mathbf{Q}}$ 的特征值组成的对角矩阵。假设 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \cdots \ \mathbf{x}_N]$, $\mathbf{A} = \text{diag}(\mu_i)$, 则 \mathbf{x}_n 为拉普拉斯矩阵 $\tilde{\mathbf{Q}}$ 特征值 μ_n 对应的特征向量, 且若将特征值按照从大到小即 $\mu_1 \geq \mu_2 \geq \cdots \geq \mu_N = 0$ 的顺序排列, 同时将特征向量 \mathbf{x}_i 进行归一化即 $\mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_i = 1$,

则式(4)可以写成

$$\tilde{\mathbf{Q}} = \sum_{i=1}^N \mu_i \mathbf{x}_i \mathbf{x}_i^T = \sum_{i=1}^{N-1} \mu_i \mathbf{x}_i \mathbf{x}_i^T + \mu_N \mathbf{x}_N \mathbf{x}_N^T = \sum_{i=1}^{N-1} \mu_i \mathbf{x}_i \mathbf{x}_i^T \quad (5)$$

式(5)中, 由于 $\mu_N = 0$, 故略去最后一项。

对式(5)中 $\tilde{\mathbf{Q}}$ 进行求逆矩阵运算, 得到

$$\tilde{\mathbf{Q}}^{-1} = \left(\sum_{i=1}^{N-1} \mu_i \mathbf{x}_i \mathbf{x}_i^T \right)^{-1} = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{\mu_i} \mathbf{x}_i \mathbf{x}_i^T = \tilde{\mathbf{Q}}^+ \quad (6)$$

式中, $\tilde{\mathbf{Q}}^+$ 为拉普拉斯矩阵 $\tilde{\mathbf{Q}}$ 的广义逆矩阵。

1.3 有效电阻矩阵

将式(2)中左右两端同时左乘拉普拉斯逆广义矩阵, 则得到式(7)。

$$\boldsymbol{\theta} = \tilde{\mathbf{Q}}^+ \mathbf{P} = (\tilde{\mathbf{Q}}_1^+ \cdots \tilde{\mathbf{Q}}_N^+) \mathbf{P} \quad (7)$$

式中, $\tilde{\mathbf{Q}}^+$ 为拉普拉斯矩阵 $\tilde{\mathbf{Q}}$ 的广义逆矩阵, 其中 $\tilde{\mathbf{Q}}_i^+ = (\tilde{\mathbf{Q}}_{i1}^+ \cdots \tilde{\mathbf{Q}}_{i2}^+)^T$ 。

引入拉普拉斯广义逆矩阵之后, 采用直流潮流计算时, 某条支路 $i-j$ 通过的潮流表达式可以写为

$$\theta_i - \theta_j = \omega_{ij} P_{ij} \quad (8)$$

式中: θ_i 、 θ_j 分别表示节点 i 和节点 j 的相角; P_{ij} 表示支路 $i-j$ 上的有功功率; ω_{ij} 则被定义为节点 i 与节点 j 之间的有效电阻^[19]。

式(8)可以进一步写成矩阵形式为

$$(\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_j)^T \boldsymbol{\theta} = (\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_j)^T \tilde{\mathbf{Q}}^+ P_{ij} (\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_j) \quad (9)$$

式中, \mathbf{e}_i 表示第 i 个元素为 1, 其余元素为 0。

对于给定线路 $i-j$, P_{ij} 为常量, 则将 ω_{ij} 采用广义逆矩阵 $\tilde{\mathbf{Q}}^+$ 表示, 则可以得到式(10)。

$$\omega_{ij} = (\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_j)^T \tilde{\mathbf{Q}}^+ (\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_j) \quad (10)$$

将式(10)右侧展开, 得到式(11)。

$$\omega_{ij} = (\tilde{\mathbf{Q}}^+)_{ii} + (\tilde{\mathbf{Q}}^+)_{jj} - 2(\tilde{\mathbf{Q}}^+)_{ij} \quad (11)$$

则得到系统的有效电阻矩阵为^[19]

$$\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{z} \mathbf{u}^T + \mathbf{u} \mathbf{z}^T - 2\mathbf{Q}^+ \quad (12)$$

式中: $\boldsymbol{\Omega}$ 表示系统的有效电阻矩阵; 向量 $\mathbf{z} = [(\tilde{\mathbf{Q}}^+)_{11} \quad (\tilde{\mathbf{Q}}^+)_{22} \quad \cdots \quad (\tilde{\mathbf{Q}}^+)_{NN}]^T$; \mathbf{u} 为元素全为 1 的列向量。

1.4 基于有效电阻矩阵的节点耦合度

易证有效电阻矩阵是主对角线元素为 0 的对称矩阵, 即有效电阻矩阵中不含自电阻, 这一点与节点阻抗(导纳)矩阵不同。基于此, 本文提出节点 i 的

耦合关键度为

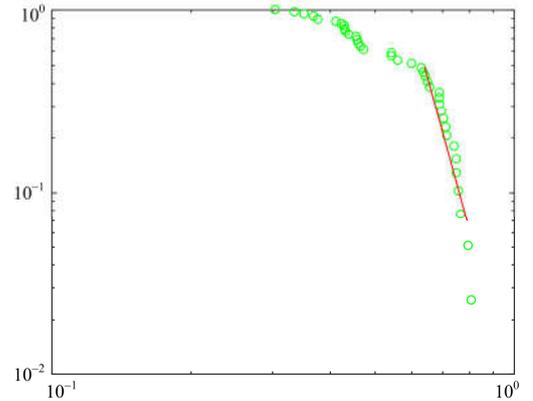
$$NCD_i = \frac{1}{\|\boldsymbol{\Omega}_i\|} \quad (13)$$

式中, $\|\boldsymbol{\Omega}_i\|$ 表示 $\boldsymbol{\Omega}$ 第 i 行的向量 1-范数。该指标可以判断节点 i 与网络中其他节点的耦合程度, 其值越小表明该节点与其他节点耦合程度越高, 其故障后对系统影响越大, 属于网络中的关键节点。

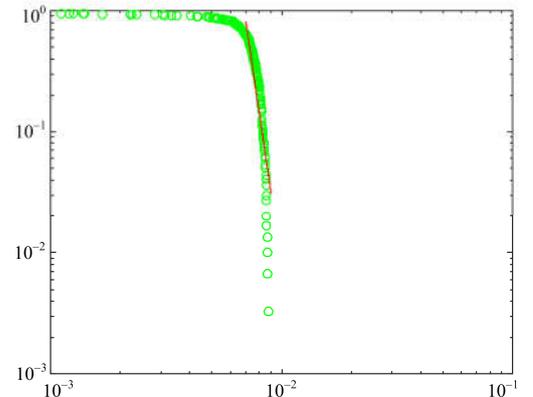
2 基于有效电阻矩阵构建电气结构网络特性分析及其物理意义

目前, 复杂网络理论中比较完善、成型的网络模型大体分为规则网络、随机网络、WS 网络及 BA 网络。但电力系统网络模型的特性仍然存在争论, 本文采用累积分布函数法^[16]验证采用有效电阻矩阵建立的电力系统网络模型的无标度特性。

根据本文提出的节点耦合度对 IEEE 部分算例进行分析得到的累计概率分布如图 1 所示。从图 1 中各标准算例的累计概率分布图中可以看出, 节点耦合关键度的概率分布呈现幂律特性, 即 $p(NCD_i) \propto (NCD_i)^{-\gamma}$ 。限于篇幅, 本文将在表 1 中给出各 IEEE 算例中幂律关系的幂指数的值。



(a) IEEE-39节点



(b) IEEE-300节点

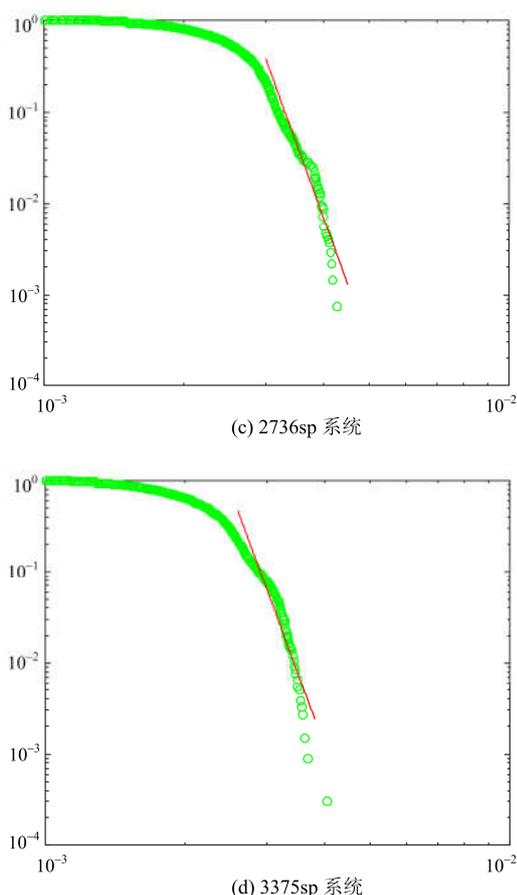


图 1 IEEE 系统耦合度累计概率分布图

Fig. 1 Cumulative probability distribution function for the IEEE nodal coupling degree

表 1 IEEE 系统中节点耦合度分布特性

Table 1 Distributed characteristic of nodal coupling degree in the IEEE systems

算例	γ	算例	γ
IEEE39	9.23	2383wp	11.88
IEEE57	6.32	2736sp	14.00
RTS79	13.18	3012wp	12.28
IEEE118	9.00	3375wp	13.83
IEEE300	13.00	—	—

可见, 根据本文方法建立的电力系统模型, 从复杂网络的角度可以证明为无标度网络, 无标度网络的显著特征就是鲁棒且脆弱, 少数的 Hub 节点就可认为是系统中的关键节点。

1.2 节在直流潮流中引入邻接矩阵, 建立了描述电力系统的拉普拉斯矩阵, 然后根据拉普拉斯矩阵得到了系统的有效电阻矩阵, 根据该矩阵可以重新构建网络模型, 该网络模型在潮流传输中满足基尔

霍夫定律, 同时拉普拉斯逆矩阵中包含了节点相角与节点注入功率的关系, 其物理意义更加贴合电力系统的实际。

另外, 电力系统一般满足 $N-1$ 准则^[20]。为了保证可靠供电, 一般情况下, 任意两节点之间都存在不止一条路径, 多条输电路径的存在也使得任意两节点之间的有效电阻减小^[19]。因此, 有效电阻矩阵中的元素 ω_{ij} 越小, 节点 i 和节点 j 的耦合性程度越高, 系统越稳定。故若节点与系统中其他节点的总有效电阻越小, 则表明该节点与系统的联系越紧密, 节点故障或全失之后对系统造成的影响越大。

3 网络生存性指标

为了验证方法的合理性, 通常要采用合理的指标进行验证。参考文献[21]根据多年运行经验提出了考察连锁故障对系统影响严重度的指标, 本文亦采用该文献中所提到的容量生存率、线路生存率两种指标来考察前文所提关键节点识别方法的合理性。此外, 用户作为电力系统的重要组成部分, 其停电比例也可考察故障对电力系统供电情况的影响, 因此, 本文引入负荷生存率来表示系统的停电严重度。考虑到节点故障后可能并非对三个指标影响都较大, 因此, 本文提出了综合生存率指标用于判断节点故障之后对系统的综合影响程度。

3.1 容量生存率

系统的容量生存率指在故障之后的稳定运行状态的系统中, 仍然在运行状态的线路总容量占线路原有容量的比例。显然, 故障之后的系统容量越大, 再次发生故障之后发生连锁故障的可能性越小。容量生存性具体计算公式如式(14)^[21]。

$$CS = \frac{\sum_{i=1}^{L'} C_i}{\sum_{j=1}^L C_j} \quad (14)$$

式中: CS 表示系统容量生存率; L 表示故障前系统中线路总数; L' 表示故障后正常运行的线路总数; C_i 和 C_j 分别表示线路 i 和线路 j 的线路容量。

3.2 负荷生存率

用户是电力系统的重要组成部分, 随着用户在电力系统中的地位越来越高, 系统应尽量保证用户的正常用电需求, 但在特殊情况下, 也必须通过切负荷措施来保证系统稳定运行。负荷生存率指的是故障之后, 通过一系列措施使系统恢复稳定时, 在稳定情况下所能提供给用户的电能占故障前系统总负荷的比例。而故障之后用户继续保持供电比例最

能体现电力系统的服务质量,因此,本文将负荷生存率 DS 作为主要观测指标,如式(15)。

$$DS=1-\frac{\sum_{i=1}^{N'_p} P'_{i,loss}}{\sum_{j=1}^{N_p} P_j} \quad (15)$$

式中: DS 表示系统负荷生存率; N_p 表示故障前负荷节点总数; N'_p 表示故障后仍有功率输出的节点数目; P_j 表示故障前负荷节点 j 的负荷功率; $P'_{i,loss}$ 表示故障后负荷节点 i 损失的负荷功率。

3.3 线路生存率

线路生存率指的是故障后满足所有安全运行条件的线路总数占原有线路总数的比例。在本文中,线路生存率可以校验节点全失之后系统是否会发生连锁故障,若节点连接线路不多,但全失之后系统线路生存率不高,表明系统发生连锁故障。线路生存率可由式(16)计算^[21]。

$$LS=\frac{L'}{L} \quad (16)$$

式中: LS 表示线路生存率; L' 表示故障后仍生存的线路; L 表示正常运行时线路的总数。

3.4 综合生存率

本文引入了容量生存率、负荷损失率和线路生存率三个指标,但是节点在故障之后可能仅对其中一个或两个指标影响大,对其他指标的影响较小,因此,基于上述三个指标,进一步提出了综合指标,即按照一定比例将上述三个指标加权得到,具体计算方法如式(17)。

$$SYN=\alpha \cdot CS+\beta \cdot DS+\lambda \cdot LS \quad (17)$$

式中: SYN 表示综合生存率指标; α 、 β 、 λ 为容量生存率、负荷生存率和线路生存率三个指标所占权重,且满足 $\alpha+\beta+\lambda=1$ 。为了简便,本文这里取 $\alpha=0.2$ 、 $\beta=0.5$ 、 $\lambda=0.3$,其值也可采用权重确定方法进行权重确定。

4 基于有效电阻的节点耦合关键度关键节点识别流程

首先,对本文在仿真时所用到的假设及相关问题进行简单说明:

1) 由于 IEEE 标准算例中,线路容量设置参数较大,造成系统正常运行时线路潮流远远小于线路容量,因此,本文对线路容量进行修改,假设线路容量与基态潮流成比例,即假设 $C_i=\kappa P_{i,base}$,其中 $P_{i,base}$ 表示系统正常运行时线路 i 上的基态潮流,且 $\kappa>1$ 。

2) 本文故障设置为变电站全失故障,也可认为

在系统运行过程中,与该变电站相连接的线路全部断开。

3) 由于变电站全失在电力系统中属较大故障,会引起大量潮流转移,易造成大停电事故^[22],因此,本文考虑了因节点全失造成的连锁故障引起的线路断线。同时,本文假设线路过载后断路器立刻动作切除线路;此外,本文不计及自动重合闸装置。

根据上述假设,本文可根据图 2 所示流程进行计算。

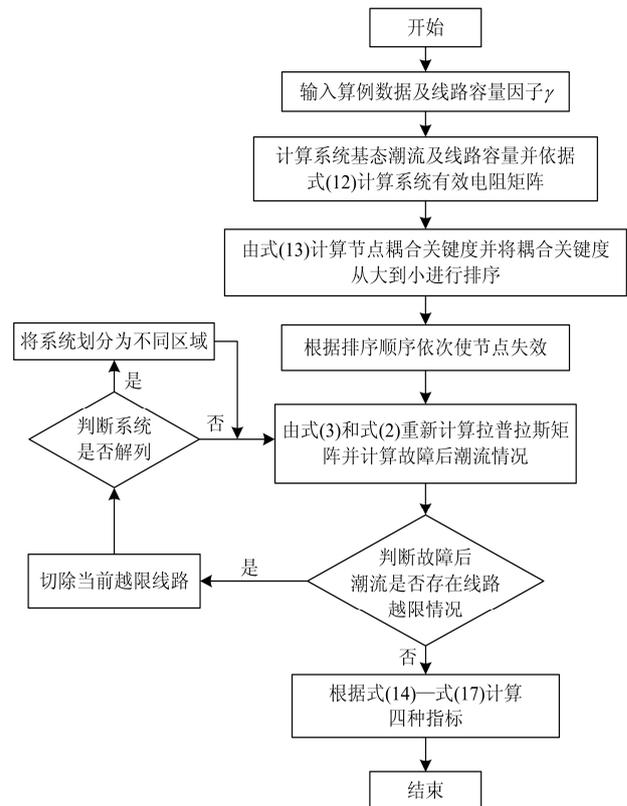


图 2 本文方法的识别流程图

Fig. 2 Flow chart of the presented method

5 算例分析

IEEE-39 节点系统网络拓扑图如图 3 所示,系统中共包含 19 个负荷节点、46 条输电线路和 10 台发电机^[10]。

表 2 为采用本文所提方法进行关键节点识别部分结果与已有的电力系统电气耦合度^[16]识别的结果对比,其中 D_e 表示电气耦合度。

由表 2 看出,根据本文所提方法得到的部分结果与文献[16]得到的部分结果(仅列出 4 个)一致,说明了本文所提方法的合理性。同时本文方法具有严格的数学基础,从直流潮流计算公式入手,得到了系统有效电阻矩阵,然后通过矩阵谱分解理论得到系统的有效电阻矩阵。此外,本文给出了有效电阻

矩阵的向量计算方法, 当系统出现变电站全停故障时再计算故障后的有效电阻矩阵也十分方便, 只需要将矩阵 u 中对应位置的元素修改为 0 即可。

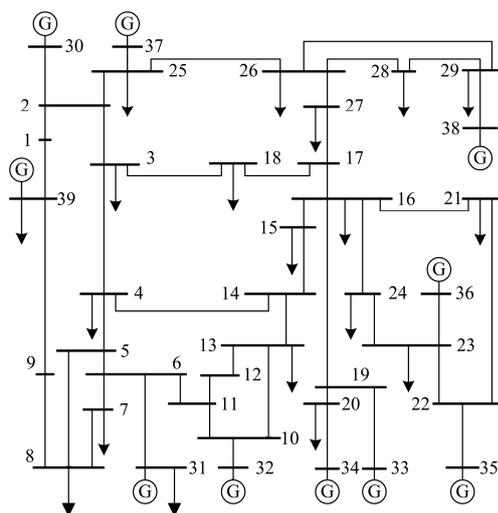


图 3 IEEE-39 节点系统拓扑图

Fig. 3 Topology of IEEE-39 bus system

表 2 IEEE-39 节点系统关键节点排名对比

Table 2 Comparison of key nodes ranking in IEEE-39 bus system

节点编号	NCD	排名	节点编号	D_c	排名
16	0.805	1	16	0.795 0	1
17	0.794	2	17	0.787 3	2
18	0.748	6	18	0.760 4	6
24	0.703	10	24	0.748 6	10

表 3 为采用本文方法计算得到的 39 节点系统排名前 10 位的结果。

表 3 IEEE-39 节点系统关键节点排名

Table 3 Key nodes ranking in IEEE-39 bus system

节点编号	NCD	排名	节点编号	NCD	排名
16	0.805	1	18	0.748	6
17	0.794	2	15	0.740	7
3	0.766	3	5	0.715	8
4	0.756	4	6	0.711	9
14	0.750	5	24	0.703	10

对采用本文方法排名前 4 位的关键节点进行仿真计算, 得到的容量生存性、负荷生存性、线路生存性及综合生存性随线路容量裕度因子变化情况如图 4—图 7。

由图 4—图 6 变化情况可知, 容量生存性、负荷生存性和线路生存性指标都随着线路容量裕度 κ 的增加而增加。显然, 由于线路容量增加, 节点故

障之后, 被迫转移分配到其余线路的功率引起线路发生连锁故障的可能性降低。但从图中也可以看出, 当容量裕度 κ 增加到一定程度时, 三种指标均不再变化, 此时线路容量已经不再是制约系统功率的主要因素, 即线路上转移功率已不足以使线路断开, 发电机所发出的功率都被传输到相应的负荷节点, 此时, 发电机所能输出功率成为制约负荷正常运行的主要因素, 这也可由图 5 中负荷生存率的变化曲线得到证明, 容量裕度增加, 系统负荷生存率逐渐增加, 但当增加到一定程度时, 负荷生存率维持在一稳定值不再变化, 出现这种现象可能的原因为: 一是故障节点为负荷节点, 其自身包含一定量的负荷; 二是系统中部分发电机停机或已到出力极限, 被迫切掉系统中部分负荷。此外, 对于固定线路容量裕度 κ , 显然 κ 越小, 负荷损失量越大, 线路和系统容量越小, 因此, 选择合适的线路容量裕度 κ 对于系统的安全稳定运行也有极其重要的作用。

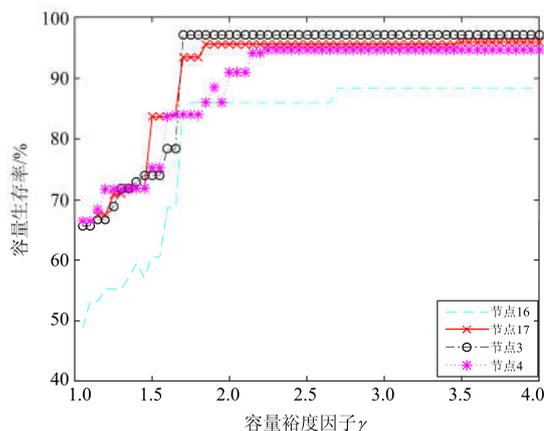


图 4 容量生存性

Fig. 4 Capacity survivability index of system

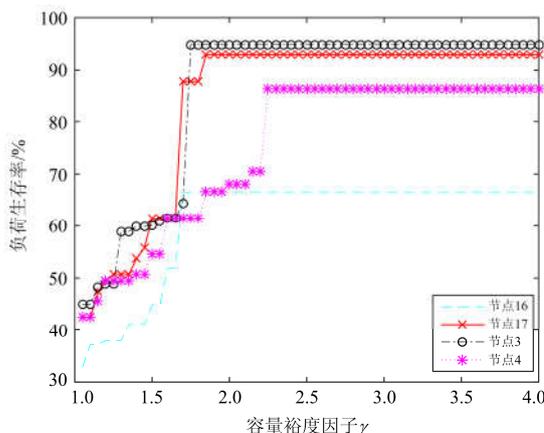


图 5 负荷生存性

Fig. 5 Load survivability index of system

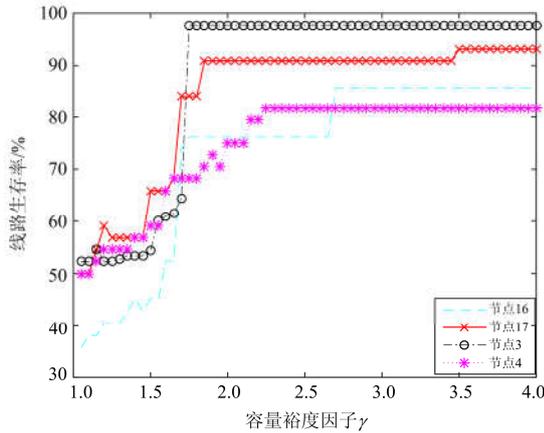


图 6 线路生存性

Fig. 6 Line survivability index of system

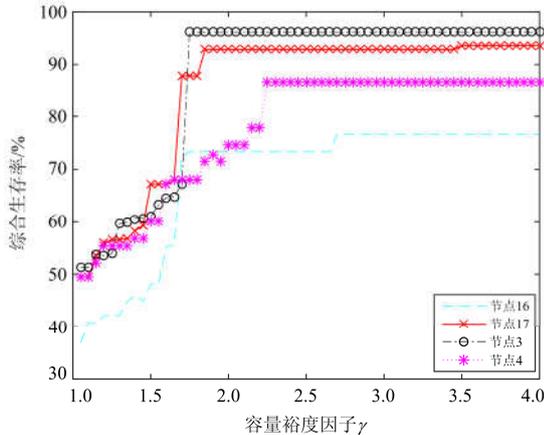


图 7 综合生存性

Fig. 7 Synthetical survivability index of system

图 7 是采用式(9)计算得到的综合生存性指标, 综合图 4—图 7 可以看出, 节点 16 故障会给系统带来巨大损失, 即使在系统线路容量很大的情况下, 各方面指标也不足 90%, 其中负荷生存率更是低于 70%。由图 3 可见, 节点 16 故障后, 发电机 33、34 输出功率的唯一路径线路 16-19 断开, 而同时断开的线路有 16-21、16-24, 系统发生解列。对于节点 17、节点 3、节点 4 故障, 虽然系统未发生解列, 但是这 3 个节点在网络中均起到缩小功率传输路径的作用, 在网络中具有较大的耦合程度。可见本文方法对于系统中具有关键性地位的节点有一定的识别能力。

图 8 为线路容量裕度因子 $\gamma=1.5$ 时系统各种指标的生存率。由图 3 可知, 排名前 10 位的节点具有一个共同点: 都处于网络拓扑结构的中心位置, 若这些节点故障退出运行会影响到系统中重要输电通道, 进而影响到系统的稳定性。这也由图 8 中各节

点故障后系统生存性指标得到了验证, 排名前 10 位节点故障之后系统综合生存率基本(除节点 15 外)在 70%以下, 而节点 15 故障后综合生存率也不足 80%, 这说明本文方法对关键节点的识别有一定适用性。仿真结果也说明了少数节点在电力系统运行中起着重要的作用, 侧面印证了电力系统具有无标度网络特性。

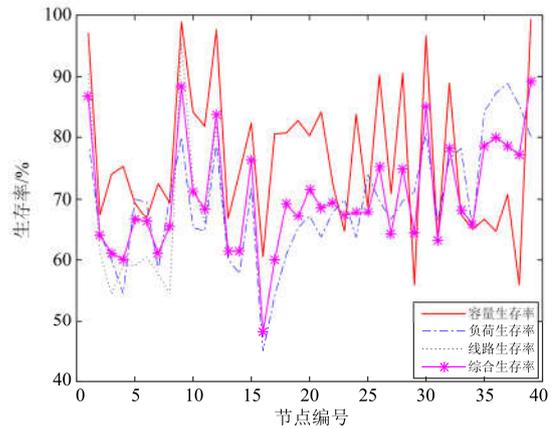


图 8 $\gamma=1.5$ 时系统生存率

Fig. 8 System survivability index when $\gamma=1.5$

6 结论

本文将图谱理论引入到直流潮流中, 从数学角度得到描述电力系统网络拓扑结构的有效电阻矩阵。该矩阵克服了传统关键节点识别方法不能有效满足基尔霍夫定律的不足, 不仅包含了线路阻抗的相关信息, 还能体现出系统节点注入功率与节点相角的定量关系, 其物理背景更加切合实际电力系统。之后, 根据有效电阻矩阵提出了节点耦合关键度, 并验证了系统的无标度网络特性。

通过对 IEEE-39 节点系统进行算例仿真验证, 证明了根据有效电阻矩阵得到的各节点的耦合关键度能够有效识别拓扑位置关键的节点, 而这些节点并非一定属于传统复杂网络理论识别的节点, 对于预防电力系统事故具有指导作用。此外, 本文的仿真结果也表明, 选择合适的线路容量能够有效避免系统故障后引发的连锁故障, 从而保证系统的稳定运行。

最后, 本文方法对于识别处于系统边缘但对系统安全运行有重要影响的节点略显不足, 因此, 如何有效识别此类节点将是下一步的研究方向。

参考文献

[1] HAIDAR A M A, MOHAMED A, HUSSAIN A. Vulnerability assessment of power system using various

- vulnerability indices[C] // 2006 4th Student Conference on Research and Development, June 27-28, 2006, Selangor, Malaysia: 224-229.
- [2] 曾瑛, 朱文红, 邓博仁, 等. 基于电网影响因子的电力通信网关键节点识别[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 102-108.
- ZENG Ying, ZHU Wenhong, DENG Boren, et al. Crucial node decision algorithm based on power network impact factor in electric power communication network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 102-108.
- [3] ANJI M, JIAXI Y, ZHIZHONG G. Electric power grid structural vulnerability assessment[C] // 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 18-22, 2006, Montreal, Canada: 6 pp.
- [4] ALBERT R, ALBERT I, NAKARADO G L. Structural vulnerability of the North American power grid[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2004, 69(2): 292-313.
- [5] 孟仲伟, 鲁宗相, 宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 21-24.
- MENG Zhongwei, LU Zongxiang, SONG Jingyan. Comparison analysis of the small-world topological model of Chinese and American power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 21-24.
- [6] 胡娟, 李智欢, 段献忠. 电力调度数据网结构特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 53-59.
- HU Juan, LI Zhihuan, DUAN Xianzhong. Structural feature analysis of the electric power dispatching data network[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 53-59.
- [7] 丁明, 韩平平. 基于复杂系统理论的电网连锁故障研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005, 28(9): 1047-1052.
- DING Ming, HAN Pingping. Research on power system cascading failure with complex system theory[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2005, 28(9): 1047-1052.
- [8] CHEN X, JIANG Q, CAO Y. Impact of characteristic path length on cascading failure of power grid[C] // 2006 International Conference on Power System Technology, October 22-26, 2006, Chongqing, China: 1-5.
- [9] 梁才, 刘文颖, 温志伟, 等. 电网组织结构对其自组织临界性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 6-11.
- LIANG Cai, LIU Wenyong, WEN Zhiwei, et al. The influences of power grid structure on self-organized criticality[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 6-11.
- [10] 丁明, 过羿, 张晶晶, 等. 基于效用风险熵权模糊综合评判的复杂电网节点脆弱性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 214-223.
- DING Ming, GUO Yi, ZHANG Jingjing, et al. Node vulnerability assessment for complex power grids based on effect risk entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 214-223.
- [11] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 33-39.
- XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 33-39.
- [12] 刘小丽, 毛弋, 梁杉, 等. 基于综合介数的电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 116-121.
- LIU Xiaoli, MAO Yi, LIANG Shan, et al. Identification of vulnerable lines in power grid based on comprehensive betweenness index[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 116-121.
- [13] 刘文颖, 蔡万通, 张宁, 等. 基于加权网络拓扑熵的电网自组织临界状态演化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5740-5748.
- LIU Wenyong, CAI Wantong, ZHANG Ning, et al. Evolution of grid's self-organizing critical state based on weighted network topology entropy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5740-5748.
- [14] BOMPARD E, NAPOLI R, XUE F. Analysis of structural vulnerabilities in power transmission grids[J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2009, 2(1): 5-12.
- [15] 王佳裕, 顾雪平, 王涛, 等. 一种综合潮流追踪和链接分析的电力系统关键节点识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 22-29.
- WANG Jiayu, GU Xueping, WANG Tao, et al. Power system critical node identification based on power tracing and link analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 22-29.
- [16] 谭玉东, 李欣然, 蔡晔, 等. 基于电气距离的复杂电网关键节点识别[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 146-152.
- TAN Yudong, LI Xinran, CAI Ye, et al. Critical node identification for complex power grid based on electrical distance[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 146-152.

- 146-152.
- [17] 田贵贤. 图谱理论和几类矩阵的谱与组合特征研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
TIAN Guixian. Study on graph spectra theory and spectra of certain classes of Matrices with their combinatorial characteristics[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
- [18] 辜姣. 基于归一化拉普拉斯谱的谱距离及其在复杂网络上的应用[D]. 武汉: 华中师范大学, 2014.
GU Jiao. The spectral distance based on the normalized Laplacian and its applications on complex networks[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2014.
- [19] CETINAY H, KUIPERS F A, VAN MIEGHEM P. A topological investigation of power flow[J]. IEEE Systems Journal, 2017, 99: 1-9.
- [20] 王涛, 李渝, 顾雪平, 等. 电网关键线路序元搜索方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 153-162.
WANG Tao, LI Yu, GU Xueping, et al. Study of grid's key line sequence search method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 153-162.
- [21] KOÇ Y, WARNIER M, KOOIJ R E, et al. A robustness metric for cascading failures by targeted attacks in power networks[C] // 2013 10th IEEE International Conference on Networking, Sensing And Control (ICNSC), April 10-12, 2013, Evry, France: 48-53.
- [22] 徐岩, 郅静. 基于直流潮流和虚拟母线的多控制节点防连锁过载跳闸策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(13): 77-86.
XU Yan, ZHI Jing. A multi control-node emergency control strategy based on DC power flow and virtual bus[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 77-86.
-
- 收稿日期: 2017-05-26; 修回日期: 2017-07-03
- 作者简介:
- 栗然(1965—), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析、运行与控制、新能源与并网技术; E-mail: liranlelele@163.com
- 靳保源(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行与控制; E-mail: dark_nights@126.com
- 张凡(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行与控制。
- (编辑 魏小丽)