

基于电压抗干扰因子与综合影响因子的电网关键节点辨识

王炫丹¹, 李华强¹, 廖烽然², 李春海¹, 王羽佳³, 李岩²

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 国网山东省电力公司烟台供电公司, 山东 烟台 264003;

3. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610042)

摘要:针对现有节点辨识方法存在的评价角度单一、指标权重选取过于片面的问题,从抗干扰能力与综合影响力两方面出发,提出一种多层次多角度的电网关键节点辨识方法。基于运行可靠性理论,构建支路停运下的节点电压抗干扰因子,克服了传统节点抗干扰能力评估仅考虑负荷波动的不足;基于电气介数与潮流冲击熵,构建考虑节点社会属性的拓扑结构影响因子与考虑支路容量裕度的运行状态影响因子,综合表征节点影响力;采用灰色关联投影评价模型进行多指标综合,得到了兼顾主观专家偏好与客观数据信息的节点关键度排序。IEEE 30 节点系统及某地区实际电网的仿真结果验证了所提方法的全面性和科学性。

关键词:关键节点;电压抗干扰因子;综合影响因子;静态能量函数;电气介数;潮流冲击熵;灰色关联投影

中图分类号:TM 76

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.04.012

0 引言

近年来,世界范围内发生的大停电事故为电力系统的安全稳定运行带来了严峻的挑战^[1-4]。大停电事故的源发性故障主要为支路开断^[1-2]和母线跳闸^[3-4]。与支路开断相比,由母线跳闸引发的大停电事故的后果更为严重,且短期内不易采取有效的紧急控制措施。因此,全面有效地辨识关键母线可为电网安全稳定运行及早期预警提供有价值的参考,意义深远。

母线作为电能传输的出发点和汇聚地,在拓建模中通常被视为节点^[5]。目前,电网关键节点的辨识大多基于脆弱性评估实现^[6]。根据评估重点的不同,可将评估方法分为2类。一类方法侧重于抗干扰能力的评估,即评估系统遭受扰动时节点维持自身电压稳定的能力,常用方法有能量函数法、最小奇异值灵敏度分析法等。文献[7]基于节点势能,构建能量程度指标及趋势指标评估节点脆弱性;文献[8]考虑负荷波动,采用最小奇异值对负荷功率的灵敏度评估节点脆弱性。另一类方法侧重于影响力的评估,主要方法有社会网络分析法与系统科学分析法^[9]。社会网络分析法通过节点的位置信息与传输作用评估其关键性,对关键节点的发掘以不破坏电网拓扑完整性为基础,评估指标有介数、传输流贡献度等。文献[10]基于改进的复杂网络模型,建立介数指标集作为关键节点的辨识依据;文献[6]定义传输流贡献度,从全局角度表征节点对电能传输的贡献程度。系统科学分析法则通过从网络中有选择性地移除某个节点,以网络性能因此下降的程度衡量此节点的关键性,评估方法有熵理论、风险理论等。文献[11-12]结合节点发生故障造成的停电

损失,采用效用风险熵模型辨识关键节点。

综上,在已有关键节点辨识方法中,一类方法旨在探讨系统遭受扰动时节点抵抗干扰的能力;另一类方法侧重于分析节点在拓扑结构中的作用及其退出运行对系统功能造成的影响。然而,系统与节点相互作用,仅单方面探讨一方对另一方的影响,不能全面地评价节点关键性。文献[13]从抗干扰能力及网络传导能力两方面综合评价节点脆弱性,但扰动模式仅考虑负荷波动,且缺乏对节点故障后果的研究。基于此,本文构建了一种计及抗干扰能力(系统对节点的影响)与综合影响力(节点对系统的影响)双重作用的关键节点辨识模型。首先,在传统辨识模型的基础上,构建了故障模式下的节点电压抗干扰因子,完善了节点抗干扰能力评价体系;其次,构建了基于电气介数的拓扑结构影响因子与基于潮流冲击熵的运行状态影响因子,分别表征节点在拓扑结构中的作用及其退出运行对系统运行状态造成的影响;然后,采用灰色关联投影评价模型进行多指标综合,良好地协调了指标间的相互关系;最后,以IEEE 30节点系统及某地区实际电网为例,对本文模型进行仿真分析,验证了所提方法的正确性和有效性。

1 节点电压抗干扰因子

节点电压抗干扰因子用来衡量系统遭受扰动时节点维持自身电压稳定的能力。本文通过节点电压抗干扰因子评价节点在2类基本扰动模式(负荷波动与支路停运)下的抗干扰能力,以此表征系统运行状态变化对节点电压水平造成的影响。

1.1 负荷波动下的节点电压抗干扰因子

静态能量函数是负荷波动时评估节点抗干扰能力的有效工具之一^[14]。基于电力系统有功平衡与电压相角密切相关、无功平衡与电压幅值直接联

系的物理特性,将有功平衡方程对电压相角积分,无功平衡方程对电压幅值积分,得到多母线系统节点静态能量函数表达式为^[15]:

$$E_i = \int_{(\delta_i^s, U_i^s)}^{(\delta_i, U_i)} [f_i(\delta_i, U_i), g_i(\delta_i, U_i)] \left[\begin{array}{c} d\delta_i \\ dU_i \end{array} \right] =$$

$$P_{Li}(\delta_i - \delta_i^s) - U_i \sum_{j=1}^N U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s}^{\delta_i} +$$

$$U_i \sum_{j=1}^N U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \Big|_{U_i^s}^{U_i} + Q_{Li} \ln \frac{U_i}{U_i^s} -$$

$$\sum_{j=1}^N U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i} + \sum_{j=1}^N U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i} \quad (1)$$

其中, $f_i(\delta_i, U_i)$ 、 $g_i(\delta_i, U_i)$ 分别为节点 i 的有功、无功功率平衡表达式; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为节点 i 的有功注入及无功注入; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 、 j 间的电导及电纳; (δ_i, U_i) 、 (δ_i^s, U_i^s) 分别为当前运行状态及系统处于稳定运行状态时节点 i 的相角、电压; N 为系统节点数。若代入临界电压参数值,则 E_i 表示节点临界静态能量。

当负荷波动时,节点抗干扰能力体现在两方面:一方面,节点当前运行状态距离临界运行状态的静态能量裕度越小,其抗干扰能力越弱;另一方面,随着负荷波动,节点静态能量相较于电压幅值的变化越灵敏,即当前电压水平呈现不能承担此时传输任务的趋势越明显,其抗干扰能力越弱。因此,可由静态能量裕度与变化趋势共同反映负荷波动下的节点抗干扰能力。

节点静态能量裕度 ΔE_i 的表达式为:

$$\Delta E_i = |E_i - E_{icr}| \quad (2)$$

其中, E_i 、 E_{icr} 分别为节点 i 静态能量的当前值及临界值。 ΔE_i 越小,表征节点 i 当前运行状态距临界运行状态越近,其抗干扰能力越弱。

节点静态能量变化趋势 S_i 的表达式为:

$$S_i = \frac{dE_i}{dU_i} = \frac{\partial E_i}{\partial Q_i} \frac{\partial Q_i}{\partial U_i} + \frac{\partial E_i}{\partial U_i} \quad (3)$$

随着负荷的增加,节点电压呈现不断下降的趋势,节点静态能量亦将不断逼近其临界值,但各节点静态能量相较于电压幅值的变化趋势不尽相同。当 $S_i \geq 0$ 时,该节点尚能承担当前运行状态下的传输任务,维持电压稳定的能力较强;当 $S_i < 0$ 时,该节点的静态能量随着电压水平的降低而增大,电压水平恶化速度加快,节点抗干扰能力较弱。

事实上,节点静态能量裕度 ΔE_i 与节点静态能量变化趋势 S_i 并非彼此独立,而是共同作用决定节点的抗干扰能力。因此,本文综合节点静态能量裕

度与变化趋势,定义负荷波动下的节点电压抗干扰因子 $F_1(i)$ 为:

$$F_1(i) = \begin{cases} \Delta E_i S_i & S_i \geq 0 \\ \Delta E_i^{-1} S_i & S_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$F_1(i)$ 越小,表征节点 i 当前运行状态距临界运行状态越近,其趋近临界运行状态的趋势越明显,节点抵抗干扰的能力越弱。

1.2 支路停运下的节点电压抗干扰因子

支路停运会对系统局部无功平衡造成冲击,致使节点电压产生偏移。电力系统规划中,常采用概率统计值作为支路停运概率,但是运行可靠性理论表明,支路停运概率随系统所处运行状态的不同而发生变化,与传输潮流息息相关,这将对节点电压偏移产生一定的效用。因此,本文将运行可靠性理论中基于传输潮流的支路停运概率模型引入节点抗干扰能力评估中,支路停运概率随传输潮流的变化曲线详见文献[16]。

根据支路停运概率模型,遍历支路停运对节点造成的电压偏移,定义支路停运下的节点电压抗干扰因子 $F_l(i)$ 为:

$$F_l(i) = \frac{\sum_{l=1}^{N_l} |\rho_l \Delta U_l|}{U_i^0 - U_i^{\lim}} \quad (5)$$

$$\rho_l = p_l / \sum_{l=1}^{N_l} p_l \quad (6)$$

其中, N_l 为系统支路总数; ρ_l 为支路 l 停运概率的归一化权重; p_l 为支路 l 的停运概率; ΔU_l 为支路 l 停运造成节点 i 的电压偏移量; U_i^0 为节点 i 的初始电压幅值; U_i^{\lim} 为节点 i 的低压极限,一般设定为额定电压的 90%^[17]。 $F_l(i)$ 越大,表征支路停运对节点 i 造成的电压冲击越大,节点抗干扰能力越弱。

2 节点综合影响因子

系统学原理表明,结构与功能是所有系统均具有的 2 种基本属性^[18]。因此,本文将节点综合影响因子剖分为考虑节点结构影响力的拓扑结构影响因子和考虑节点功能影响力的运行状态影响因子,以此衡量节点在拓扑结构中的作用及其退出运行对系统运行状态造成的影响。

2.1 节点拓扑结构影响因子

介数是节点吞吐量、访问量、通行能力及活跃程度的反映^[19]。电气介数模型^[20]基于复杂网络理论与基尔霍夫定律,弥补了已有介数模型假设潮流只沿最短路径流动的不足,量化了各“发电-负荷”节点之间功率传输对各节点的占用情况,其物理背景更加符合电力系统实际情况。除电气属性外,电力系统中各节点兼具社会属性,而电气介数模型无法从电气影

响力与社会影响力两方面全面地衡量节点的结构影响力。因此,本文将经济因子^[18]引入电气介数模型中,定义节点拓扑结构影响因子 $B_s(i)$ 为:

$$B_s(i) = \sum_{m \in G, n \in L} \sqrt{W_m W_n} |B_{mn}(i)| \quad (7)$$

$$W_m = \frac{\varepsilon_m w_m}{\sum_{m \in G} \varepsilon_m w_m}, W_n = \frac{\varepsilon_n w_n}{\sum_{n \in L} \varepsilon_n w_n} \quad (8)$$

$$B_{mn}(i) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sum_j |I_{mn}(i, j)| & i \neq m, n \\ 1 & i = m, n \end{cases} \quad (9)$$

其中, m, n 分别为系统发电机、负荷节点; G, L 分别为发电机、负荷节点集合; W_m, W_n 分别为发电机节点 m 及负荷节点 n 结合电气属性与社会属性后的综合权重; $|B_{mn}(i)|$ 为在“发电-负荷”节点对 (m, n) 间注入单位电流源后,在节点 i 上产生的电气介数; $\varepsilon_m, \varepsilon_n$ 分别为发电机节点 m 的发电经济因子及负荷节点 n 的负荷经济因子; w_m 为发电机节点 m 的额定容量或实际出力; w_n 为负荷节点 n 的实际或峰值负荷; $|I_{mn}(i, j)|$ 为在“发电-负荷”节点对 (m, n) 间注入单位电流源后,在支路 ij 上产生的电流; j 为所有与节点 i 有支路直接相连的节点。 $B_s(i)$ 越大,表征节点 i 的拓扑结构影响力越显著。

2.2 节点运行状态影响因子

熵作为一种函数,是对系统运行状态的表征^[21]。节点潮流冲击熵^[22]可定量描述节点退出运行对系统运行状态造成的影响。

设节点 i 退出运行对支路 l 造成的潮流冲击为:

$$\Delta P_{i-l} = P_{li} - P_{l0} \quad (10)$$

其中, P_{li}, P_{l0} 分别为节点 i 退出运行后支路 l 的潮流及支路 l 的初始潮流。

则节点 i 退出运行对支路 l 造成的潮流冲击率为:

$$\alpha_{li} = \frac{\Delta P_{i-l}}{N_1 \sum_{l=1}^{N_1} \Delta P_{i-l}} \quad (11)$$

利用熵理论可得节点 i 的潮流冲击熵为:

$$H_{Ti} = - \sum_{l=1}^{N_1} \alpha_{li} \ln \alpha_{li} \quad (12)$$

H_{Ti} 反映节点 i 退出运行对系统潮流冲击的均衡程度,其值越小,表征节点 i 退出运行造成的潮流冲击在各支路上分布越不均衡,对系统运行状态造成的影响越大。

然而,传统的潮流冲击熵模型在表征系统运行状态时,未计及支路容量裕度的作用,仅考虑了潮流冲击的均衡性。实际运行中,不同支路容量裕度不

同,即使某节点退出运行造成的潮流冲击在各支路上完全均衡分布,某条支路仍可能因其容量裕度较小以致过载。因此,本文结合支路容量裕度对节点潮流冲击熵进行修正,定义节点运行状态影响因子 $H_s(i)$ 为:

$$H_s(i) = - \sum_{l=1}^{N_1} \sigma_{li} \ln \sigma_{li} \quad (13)$$

$$\sigma_{li} = \frac{\lambda_{li}}{N_1 \sum_{l=1}^{N_1} \lambda_{li}} \quad (14)$$

$$\lambda_{li} = \frac{\mu_{li} - \mu_{l0}}{\mu_{l\max} - \mu_{l0}} \quad (15)$$

其中, σ_{li} 为节点 i 退出运行后支路 l 的裕度比占裕度比总量的比重; λ_{li} 为节点 i 退出运行后支路 l 的裕度比; $\mu_{l0}, \mu_{li}, \mu_{l\max}$ 分别为支路 l 的初始负载率、节点 i 退出运行后的负载率、极限负载率。

当 $H_s(i)$ 达到最大值 $\ln N_1$ 时,节点 i 退出运行造成的潮流冲击按照容量裕度在各支路中合理分布。 $H_s(i)$ 越小,表征节点 i 退出运行造成的潮流冲击越集中分布在某几条支路上,越易造成支路过载甚至引发连锁故障,运行状态影响力越显著。

3 电网关键节点辨识模型

3.1 灰色关联投影评价模型简介

电力系统因其庞大的系统结构及错综复杂的直接、间接耦合,在发、输、配、送四大环节均存在一定的不确定性及不完全性,实质上是一个灰色系统。因此,对电力系统中的节点进行关键性评价属于灰色多属性决策范畴。灰色关联投影评价模型将灰色系统理论与矢量投影原理相结合,以各方案在参考方案上的投影值大小作为评判决策方案优劣的标准,可以有效地权衡各属性对总目标的作用大小,将复杂的多属性问题转化为简单的关联度问题,能够全面地分析各属性间的相互关系,有效地避免单方向偏差。

3.2 节点关键性灰色关联评价基本步骤

节点关键性灰色关联评价的基本步骤如下。

a. 决策矩阵的建立及标准化。将节点视为方案,节点关键度评价因子视为节点所具有的属性,则节点 i 可描述为 $a_i = \{F_1(i), F_r(i), B_s(i), H_s(i)\}$ 。由此构成包含 N 个节点的关键度评价信息的初始决策矩阵 $\mathbf{A} = (a_{ik})_{N \times M}$,其中 M 为节点关键度评价因子个数。为了消除因各评价因子物理属性与量纲信息不一致造成的不可公度性,在决策之前将初始决策矩阵进行标准化处理,得到标准化决策矩阵 $\mathbf{B} = (b_{ik})_{N \times M}$ 。由各评价因子的定义可知,负荷波动下的节点电压干扰因子 $F_1(i)$ 、节点运行状态影响因子 $H_s(i)$ 为成本型指标,支

路停运下的节点电压抗干扰因子 $F_i(i)$ 、节点拓扑结构影响因子 $B_s(i)$ 为效益型指标。

对于效益型指标,有:

$$b_{ik} = \frac{a_{ik} - \min(a_{ik})}{\max(a_{ik}) - \min(a_{ik})} \quad (16)$$

对于成本型指标,有:

$$b_{ik} = \frac{\max(a_{ik}) - a_{ik}}{\max(a_{ik}) - \min(a_{ik})} \quad (17)$$

b. 构造灰色关联系数矩阵。选出标准化决策矩阵中各评价因子的最优值组成参考序列 $B_0 = \{F_{10}, F_{10}, B_{s0}, H_{s0}\}$ 。根据灰色关联理论,各节点关键度序列 B_i 与参考序列 B_0 的灰色关联系数为:

$$r_{ik} = \frac{\min \min |b_0 - b_{ik}| + \rho \max \max |b_0 - b_{ik}|}{|b_0 - b_{ik}| + \rho \max \max |b_0 - b_{ik}|} \quad (18)$$

其中, ρ 为分辨系数,通常取为 0.5; $|b_0 - b_{ik}|$ 为节点 i 第 k 个关键度评价因子与参考序列相应值的绝对差。由此可得节点关键度灰色关联系数矩阵 R 。

c. 灰色关联系数矩阵加权化。节点关键度评价体系各评价因子的重要性存在差异,因此需根据各评价因子的重要程度对 R 进行加权处理。本文利用层次分析法确定各评价因子的主观权重 W_s ,利用熵权法确定各评价因子的客观权重 W_0 ,加法集成主、客观权重得到综合权重 W 。

d. 计算灰色关联投影值。节点 i 关键度序列 B_i 在参考序列 B_0 上的投影为:

$$D_i = |\vec{B}_i| \cos \theta_i = \frac{\vec{B}_i \cdot \vec{B}_0}{|\vec{B}_0|} = \frac{\sum_{k=1}^M w_k r_{ik} w_k}{\sqrt{\sum_{k=1}^M w_k^2}} = \frac{\sum_{k=1}^M r_{ik} \frac{w_k^2}{\sqrt{\sum_{k=1}^M w_k^2}}}{\sqrt{\sum_{k=1}^M w_k^2}} \quad (19)$$

D_i 反映节点 i 关键度序列 B_i 与参考序列 B_0 的关联程度。 D_i 越大,表征该节点关键度序列越接近参考序列,表明该节点在电网中的关键性越显著。

3.3 电网关键节点辨识流程

本文基于电压抗干扰因子与综合影响因子对节点关键性进行灰色关联评价,综合抗干扰能力与影响力两方面辨识关键节点,辨识流程如图 1 所示。

4 仿真分析

4.1 参数预处理

按照各评价因子定义,计算节点电压抗干扰因

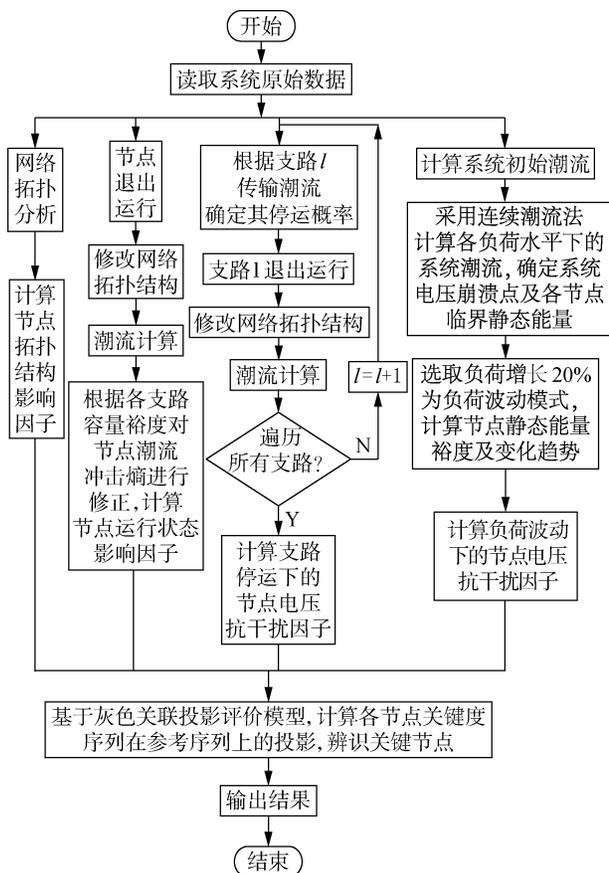


图 1 关键节点辨识流程图

Fig.1 Flowchart of identifying critical nodes

子及综合影响因子指标集。本文选取系统负荷增长 20% 作为负荷波动模式,支路传输潮流正常值的上下限设定为 $0.95 S_N \sim 1.05 S_N$ (S_N 为支路传输潮流额定容量)。

利用层次分析法构造比较矩阵时,考虑以下因素:负荷波动与支路停运作为 2 类独立的扰动模式对节点抗干扰能力的贡献作用相当;拓扑结构影响因子与运行状态影响因子分别从结构属性与功能属性衡量节点的影响力,认为其重要性相当;电压抗干扰因子与综合影响因子分别从抗干扰能力(系统对节点的影响)及影响力(节点对系统的影响)两方面表征节点与系统间的相互关系,认为其同等重要。结合标准化决策矩阵中的数据利用熵权法确定各评价因子的客观权重。按相同比重加法集成主、客观权重得到各评价因子的综合权重详见附录 A 中表 A1、A2。

4.2 仿真分析

4.2.1 IEEE 30 节点系统仿真分析

IEEE 30 节点系统网络拓扑图如图 2 所示。

利用本文方法计算各节点关键度序列在参考序列上的投影值,以此表征节点关键性。关键节点辨识结果如图 3 所示。其中,关键度排序前十的各节

点评价因子值如表 1 所示。

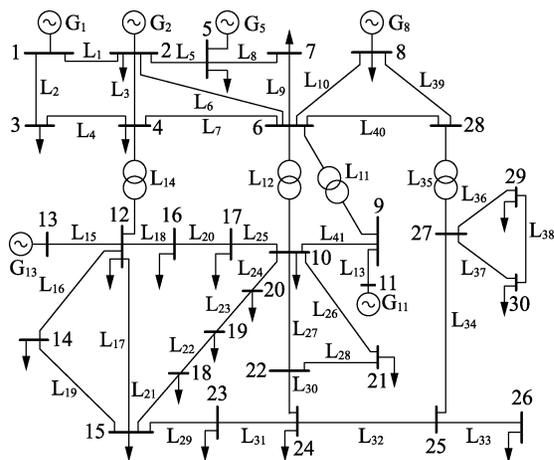


图 2 IEEE 30 节点系统网络拓扑图

Fig.2 Network topology of IEEE 30-bus system

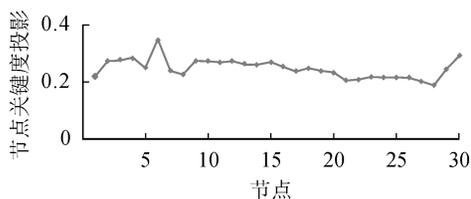


图 3 关键节点辨识结果

Fig.3 Identification result of critical nodes

表 1 IEEE 30 节点系统关键节点辨识结果
Table 1 Identification results of critical nodes
in IEEE 30-bus system

排序	节点	$F_1(i)$	$F_2(i)$	$B_s(i)$	$H_s(i)$	节点关键度投影值
1	6	-0.521 0	0.010 0	1.193 0	3.711 0	0.348 8
2	30	0.250 0	0.086 0	0.067 0	8.006 0	0.290 0
3	4	-0.336 0	0.018 0	0.764 0	3.492 0	0.285 2
4	3	-0.426 0	0.016 0	0.297 0	3.435 0	0.274 7
5	9	-0.598 0	0	0.566 0	4.168 0	0.273 0
6	2	-0.104 0	0	0.683 0	3.388 0	0.272 4
7	10	-0.491 0	0.016 0	0.707 0	4.496 0	0.272 0
8	12	-0.469 0	0.016 0	0.675 0	4.575 0	0.269 8
9	15	-0.565 0	0.034 0	0.398 0	5.082 0	0.269 2
10	11	-0.741 0	0	0.136 0	4.706 0	0.268 2

由图 3、表 1 可知，利用本文方法辨识出的关键节点中，节点 6 的关键性位列首位。从实际运行角度分析，其关键性主要体现在以下两方面：一方面，节点 6 作为系统中最重要联络节点，当系统遭受扰动时，其需及时调整功率输送以维持系统潮流平衡，较其他节点更易受到扰动影响，抗干扰能力弱；另一方面，节点 6 作为与主干变压器支路相连接的节点，其一旦退出运行将阻断 G_5 、 G_8 中部功率输送通道，致使全网潮流大幅转移，加重系统其他元件的传输负担，影响力显著。即节点 6 从抗干扰能力与影响力两方面均体现了显著的关键性。与节点 6 类似，节点 4、9、10、12 作为系统中重要的中枢节点，处

于能量汇总与分配的关键位置，抗干扰能力弱，影响力显著，因此相较于其他节点更为关键。

为了进一步验证本文方法的全面科学性，将本文方法与侧重于抗干扰能力评价的方法 1^[15]、侧重于影响力分析的方法 2^[20] 以及综合评价节点脆弱性的方法 3^[13] 进行对比，结果如表 2 所示。

表 2 关键节点辨识结果比较

Table 2 Identification result comparison of critical nodes

排序	节点			
	本文方法	方法 1	方法 2	方法 3
1	6	13	6	2
2	30	11	4	1
3	4	14	10	4
4	3	9	2	6
5	9	15	12	3
6	2	16	9	10
7	10	6	15	12
8	12	10	7	9
9	15	12	5	5
10	11	3	3	15

由表 2 可知，本文方法中关键性排序前十的节点中包含了方法 1—3 中均有的节点 3、6、9、10、12、15 及方法 1—3 中的部分节点 2、4、11，四者相似度较高，验证了本文方法的正确性。

本文方法与其他 3 种方法的差异主要在于个别关键节点的筛选及关键节点的排序不尽相同，这是由于 4 种方法的评价指标及评价侧重点有所差异。与其他 3 种方法不同，本文方法将节点 30 视为关键节点，原因在于节点 30 作为系统末端负荷节点，支路停运时其节点电压偏移量占全网节点电压偏移总量的 10.40%，支路停运下的抗干扰能力为全网最弱。传统方法对节点抗干扰能力的评估仅考虑负荷波动模式，以至于其评估节点 30 的关键度有所下降。

方法 1 中节点 13 的关键度位居首位，节点 13 作为发电机节点，负荷增加时需及时调整出力以维持系统潮流平衡，为全网静态能量变化最为灵敏的节点，易受扰动影响，但其位于系统边缘地带，固有结构重要度较小，退出运行对系统运行状态造成的影响较微弱，因此在本文方法中其排序相对靠后。

与方法 2 相比，本文方法中节点 3 的关键度更为突出，主要原因在于节点 3 与发电机直接相连，承担着向电网注入电能的任务，负荷波动及支路停运时须立即调整出力以维持系统潮流平衡，抗干扰能力较弱，且其退出运行造成的潮流冲击在支路上聚集分布，相较于其他节点更易引起支路重载甚至潮流越限，所以节点 3 的状态影响力显著。

方法 3 将节点 2 视为全网最关键节点，原因在于节点 2 作为全网出力最大的发电机节点，节点所

带负荷占据全网总负荷的7.93%,而且与节点2直接相连的支路 L_1 、 L_3 、 L_5 、 L_6 承载了全网传输潮流的26.88%。按照方法3定义,节点2的网络传导能力为全网最强,且负荷增长时其抗干扰能力为全网最弱,因此其关键度位居首位。相较于方法3,本文节点抗干扰能力评估方法兼顾了负荷增长与支路停运2种模式,节点2作为发电机节点,具有强大的无功支撑,支路停运时其电压水平保持不变,抗干扰能力较单一考虑负荷增长模式有所提高,因此本文方法评估节点2的关键度有所下降。

4.2.2 某地区实际电网仿真分析

为了验证本文方法应用于实际电网中的合理有效性,利用本文方法对某地区实际电网进行关键节点辨识。该地区电网等效网络拓扑图详见附录A中图A1,初始数据采用该地区某年第四季度的运行数据。关键节点辨识结果如表3所示。

表3 某地区实际电网关键节点辨识结果

Table 3 Identification results of critical nodes in a practical area power network

排序	节点	$F_1(i)$	$F_2(i)$	$B_s(i)$	$H_s(i)$	节点关键度 投影值
1	57	16.594 2	0.015 0	4.831 40	3.388 0	0.999 0
2	65	10.663 8	0.004 0	4.854 40	3.430 0	0.998 4
3	1	0.013 22	0	0.000 45	5.080 2	0.731 7
4	5	1.195 60	0.020 0	0.005 52	4.019 0	0.536 5
5	6	1.195 60	0.012 0	0.004 91	3.998 7	0.527 9
6	4	1.365 20	0.010 0	0.004 62	6.256 8	0.466 2
7	2	0.456 44	0	0.001 51	8.257 8	0.423 3
8	111	23.708 1	0	0.044 711	8.749 6	0.335 4
9	110	24.508 5	0.010 0	0.043 474	8.368 9	0.322 7
10	21	5.433 10	0.010 0	0.011 688	9.638 7	0.321 5

由表3可知,利用本文方法辨识出的该地区电网关键节点中,节点57、65的关键度位居前2位。分析该地区电网实际运行情况可知,节点57、65为该地区电网网架的主干支撑,若退出运行将造成与该地区东西、东南电网直接相连的支路断开,从而致使该地区电网潮流无法平衡,此时若不采取切负荷措施,将致使全网潮流大幅转移,而造成大量支路因过载退出运行,最终导致灾难性事故的发生,影响力显著。

节点1、5、6、4、2集中分布于该地区电网的西北方向,均为发电厂或较大型变电站,依次连接构成该地区电网的一条关键功率输送通道。其中,发电机节点1、2直接相连,为该地区电网的主要电能来源之一,负荷波动时需立即调节出力以维持系统潮流平衡,相较于其他节点更易受到扰动影响,所以节点1、2的抗干扰能力弱。

节点111、110受负荷波动影响较小,抗干扰能力较强,但其通过节点32与整个地区的主干网络相连接,若退出运行将致使局部区域形成孤网,所以节

点111、110的综合影响力显著。

综上,利用本文方法辨识的关键节点与系统间的相互作用较为强烈,其易受系统运行状态变化的影响,且若发生故障对系统功能造成的影响较为显著,在实际运行中应重点监控。

5 结论

本文从节点与系统相互作用的客观事实出发,提出了一种基于电压抗干扰因子与综合影响因子的电网关键节点辨识方法,得到以下结论:

a. 节点电压抗干扰因子可有效地衡量负荷波动及支路停运2种典型扰动模式下的节点抗干扰能力,弥补了传统节点抗干扰能力评估方法扰动模式单一的不足;

b. 节点综合影响因子从拓扑结构与运行状态两方面表征了节点的影响力,克服了传统辨识方法从结构或状态单一层面对节点进行关键性评价的不全面性;

c. 灰色关联投影评价模型有效地结合了主观决策与客观评价,将复杂的多属性问题转化为关联度问题,良好地协调了指标间的相互关系;

d. 本文方法综合抗干扰能力(系统对节点的影响)与影响力(节点对系统的影响)两方面辨识关键节点,较传统单视角辨识方法更为全面科学;

e. 本文所采用的支路停运概率模型仅考虑了支路传输潮流的影响,未计及隐性故障、天气条件等诸多不确定因素的作用,如何更全面地接近电力系统运行实际将是笔者下一步的研究方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 方永杰. 美国“9·8”大停电对连锁故障防控技术的启示[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 1-7.
FANG Yongjie. Lessons from September 8, 2011 Southwest America blackout for prevention and control of cascading outages[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 1-7.
- [2] 汤涌, 卜广全, 易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 167-174.
TANG Yong, BU Guangquan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian Power Grid on July 30 and 31[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 167-174.
- [3] 林伟芳, 汤涌, 孙华东, 等. 巴西“2·4”大停电事故及对电网安全稳定运行的启示[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 1-5.
LIN Weifang, TANG Yong, SUN Huadong, et al. Blackout in Brazil Power Grid on February 4, 2011 and inspirations for stable operation for power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 1-5.
- [4] 林伟芳, 孙华东, 汤涌, 等. 巴西“11·10”大停电事故分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 1-5.
LIN Weifang, SUN Huadong, TANG Yong, et al. Analysis and

- lessons of the blackout in Brazil Power Grid on November 10, 2009 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 1-5.
- [5] 刘天琪, 邱晓燕, 李华强. 现代电力系统分析理论与方法 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 18-19.
- [6] 鞠文云, 李银红. 基于最大流传输贡献度的电力网关键线路和节点辨识 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 6-12.
JU Wenyun, LI Yinong. Identification of critical lines and nodes in power grid based on maximum flow transmission contribution degree [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 6-12.
- [7] 刘群英, 刘俊勇, 刘起方. 节点势能架构下的电压脆弱性评估 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 30-37.
LIU Qunying, LIU Junyong, LIU Qifang. Voltage vulnerability assessment in the node potential energy framework [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 30-37.
- [8] 陈敏, 张步涵, 段献忠, 等. 基于最小奇异值灵敏度的电压稳定薄弱节点研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(24): 36-39.
CHEN Min, ZHANG Buhang, DUAN Xianzhong, et al. Study on weak buses of voltage stability based on sensitivity of minimum singular value [J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 36-39.
- [9] 赫南, 李德毅, 涂文燕, 等. 复杂网络中重要性节点发掘综述 [J]. 计算机科学, 2007, 34(12): 1-5.
HE Nan, LI Devi, GAN Wenyan, et al. Mining vital nodes in complex networks [J]. Computer Science, 2007, 34(12): 1-5.
- [10] 徐敬友, 陈冲, 罗纯坚, 等. 基于改进复杂网络模型的电网关键环节辨识 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 53-61.
XU Jingyou, CHEN Chong, LUO Chunjian, et al. Identification of power grid key parts based on improved complex network model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 53-61.
- [11] 丁明, 过羿, 张晶晶. 基于效用风险熵的复杂电网连锁故障脆弱性辨识 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 52-57.
DING Ming, GUO Yi, ZHANG Jingjing. Vulnerability identification for cascading failures of complex power grid based on effect risk entropy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 52-57.
- [12] 丁明, 过羿, 张晶晶, 等. 基于效用风险熵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.
- [13] 雷成, 刘俊勇, 魏震波, 等. 计及网络传导能力与抗干扰能力的节点综合脆弱评估模型 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 144-149.
LEI Cheng, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Integrative evaluation model of node vulnerability considering network transmission ability and anti-interference ability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 144-149.
- [14] 王羽佳, 李华强, 刘沛清, 等. 基于改进 DEAHF 模型的支路综合脆弱性评估方法 [J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1249-1256.
WANG Yujia, LI Huaqiang, LIU Peiqing, et al. A branch comprehensive vulnerability assessment method based on improved DEAHF model [J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1249-1256.
- [15] 张程, 于永军, 李华强, 等. 考量能量裕度及权重因子的电力系统节点综合脆弱性分析 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 136-141.
ZHANG Cheng, YU Yongjun, LI Huaqiang, et al. Analysis of nodal comprehensive vulnerability considering energy margin and weight factor for power system [J]. Power System Protection and Control, 2016, 36(3): 136-141.
- [16] 孙元章, 程林, 刘海涛. 基于实时运行状态的电力系统运行可靠性评估 [J]. 电网技术, 2005, 29(15): 6-12.
SUN Yuanzhang, CHENG Lin, LIU Haitao. Power system operating reliability evaluation based on real-time operating state [J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 6-12.
- [17] FEI Xiao, MCCALLEY J D. Power system risk assessment and control in a multiobjective framework [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 78-85.
- [18] 刘沛清, 李华强, 赵阳, 等. 考虑元件综合重要度的电网安全风险评估方法 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 132-138.
LIU Peiqing, LI Huaqiang, ZHAO Yang, et al. Power grid security risk assessment considering comprehensive element importance index [J]. Power System Protection and Control, 2015, 35(4): 132-138.
- [19] 魏震波, 刘俊勇, 朱觅, 等. 基于网络数字化挖掘的电网拓扑结构辨识 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 12-17.
WEI Zhenbo, LIU Junyong, ZHU Mi, et al. Identification of power grid topological structure based on network data mining [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 12-17.
- [20] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 基于电气介数的电网连锁故障传播机制与积极防御 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 61-68.
XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Cascading failure mechanism in power grid based on electric betweenness and active defence [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 61-68.
- [21] 曹一家, 王光增, 曹丽华, 等. 基于潮流熵的复杂电网自组织临界态判断模型 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 1-6.
CAO Yijia, WANG Guangzeng, CAO Lihua, et al. An identification model for self-organized criticality of power grids based on power flow entropy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 1-6.
- [22] 李勇, 刘俊勇, 刘晓宇, 等. 基于潮流熵的电网连锁故障传播元件的脆弱性评估 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 11-16.
LI Yong, LIU Junyong, LIU Xiaoyu, et al. Vulnerability assessment in power grid cascading failures based on entropy of power flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 11-16.

作者简介:



王炫丹

王炫丹 (1994—), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统脆弱性评估 (E-mail: Wangxuandan120@163.com);

李华强 (1965—), 男, 河北清苑人, 教授, 博士, 通信作者, 主要研究方向为电力系统分析、稳定及优化 (E-mail: lihq1986@hotmail.com);

廖烽然 (1987—), 男, 山东烟台人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为电力市场和电网线损管理 (E-mail: liaofengran@gmail.com)。

(下转第 125 页 continued on page 125)

EMU-traction network modeling of high speed railway and electromagnetic transient influence considering secondary arcing of pantograph catenary

SONG Xiaocui, LIU Zhigang

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Aiming at the electromagnetic transient phenomenon caused by the pantograph catenary arcing of high speed railway, the research on EMU (Electric Multiple Unit)-traction network modeling considering the secondary arcing is carried out based on the MTL (Multi-conductor Transmission Line) theory. The parameters of chain lumped π -type network matrix of traction network MTL under all-parallel AT (AutoTransformer) power supply mode are deduced. According to the structural parameters of CRH2-type EMU and the relative location and electrical parameters of vehicle, rail and traction network during the practical operation of EMU, the accurate simulation model of EMU-traction network with chain parameters is built on MATLAB/Simulink. The secondary arcing is taken as the research subject to simulate its influence on the traction network voltage, the electric potential of the car body, the discharge of the wheel, and the rail potential difference between the wheels, and the results show that the proposed model can effectively simulate the steady power frequency condition of the high speed railway and the electromagnetic transient phenomenon of the primary arcing and multiple arcing during off line of the pantograph catenary.

Key words: high speed railway; electric multiple unit; arc of off line pantograph catenary; electromagnetic transient; model buildings

(上接第 88 页 continued from page 88)

Critical node identification of power grid based on voltage anti-interference factors and comprehensive influence factors

WANG Xuandan¹, LI Huaqiang¹, LIAO Fengran², LI Chunhai¹, WANG Yujia³, LI Yan²

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Yantai Electric Power Supply Company, Yantai 264003, China;

3. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610042, China)

Abstract: To solve the problems of existing node identification methods such as single evaluation and too one-sided selection of index weights, a multi-level and multi-angle power grid critical node identification method is proposed from aspects of anti-interference capability and comprehensive influence. Based on the operational reliability theory, the node voltage anti-interference factors under branch outage contingency are established, overcoming the shortage of traditional node anti-interference capability evaluation method which only considers load fluctuations. Based on the electrical betweenness and impact entropy of power flow, the topological structure influence factors considering the social property of nodes and operational status influence factors considering the capacity margin of branches are established, to characterize the effects of nodes comprehensively. The multiple indexes are evaluated comprehensively by grey relation projection model to obtain the rank of node importance degree, which considers both the subjective favoritism and objective information. Simulative results of IEEE 30-bus system and a practical area power network verify the scientificness and completeness of the proposed method.

Key words: critical nodes; voltage anti-interference factors; comprehensive influence factors; static energy function; electrical betweenness; impact entropy of power flow; grey relation projection

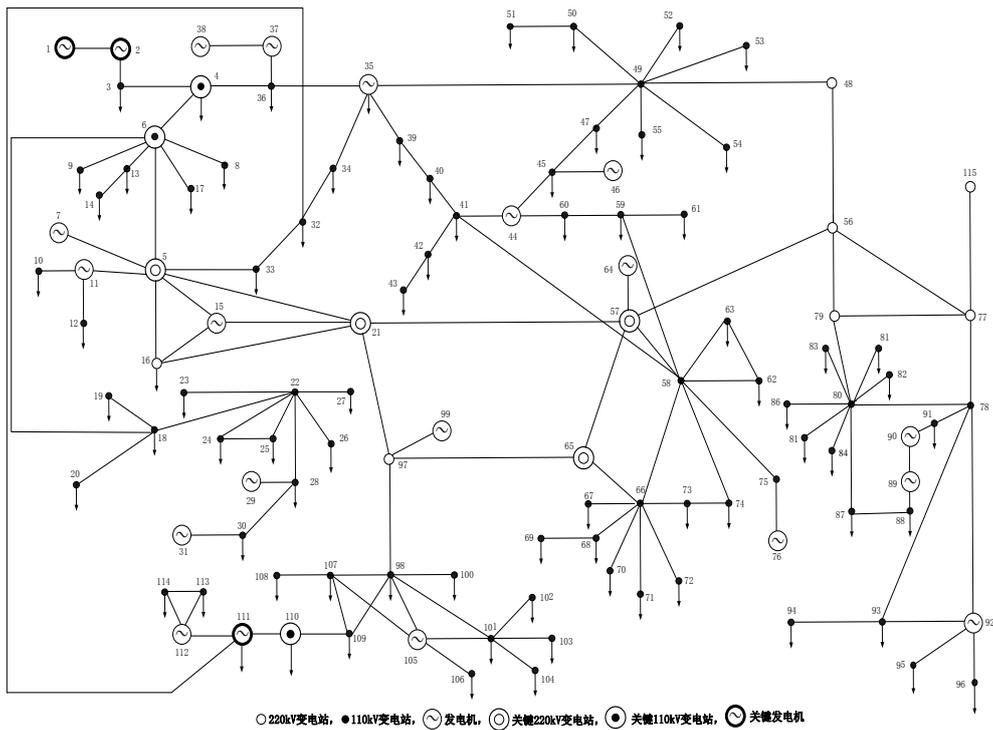
附录 A

表 A1 各评价因子权重值 (IEEE 30 节点系统)
Table A1 Weights of evaluation factors(IEEE 30-bus system)

评价因子	W_s	W_o	W
$F_1(i)$	0.2500	0.2439	0.2470
$F_t(i)$	0.2500	0.2998	0.2749
$B_s(i)$	0.2500	0.2617	0.2559
$H_s(i)$	0.2500	0.1946	0.2222

表 A2 各评价因子权重值 (某地区实际电网)
Table A2 Weights of evaluation factors(a practical area power network)

评价因子	W_s	W_o	W
$F_1(i)$	0.2500	0.2379	0.2440
$F_t(i)$	0.2500	0.3497	0.2999
$B_s(i)$	0.2500	0.2735	0.2618
$H_s(i)$	0.2500	0.1389	0.1943



附图 A1 某地区实际电网等效网络拓扑图
Fig.A1 Equivalent network topology of a practical area power network