

计及电压等级的电网关键节点识别

刘美君¹, 刘吉龙², 李华强¹, 张弘历³, 陈雨晴⁴, 罗怡德⁵

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 国家电网公司滨州供电公司, 山东 滨州 256600;
3. 国网江苏省电力公司徐州供电分公司, 江苏 徐州 221005; 4. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041;
5. 国网江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 211100)

摘要:从泰尔熵标准基本原理出发,在计及系统电压等级的基础上,综合考虑节点静态电压稳定性和支路转移潮流分布均衡性,提出一种电网关键节点辨识方法。从节点负荷变化对系统电压幅值增长和支路传输潮流变化的影响机理出发,建立电压增长率泰尔熵模型和加权潮流冲击率泰尔熵模型,描述系统电压增长和支路潮流变化的均衡性;采用二元分析法与熵权法相结合的权重分析法对指标进行综合,得到既结合主观偏好又考虑客观数据的关键节点综合评估指标,从而准确辨识出系统关键节点。IEEE 30 节点系统及西南某地区实际系统的仿真结果验证了所提模型的有效性。

关键词:电压增长率;加权潮流冲击率;电压等级;泰尔熵;组内差异;组间差异

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.008

0 引言

现代电力系统的复杂特性表现在规模庞大、元件复杂、供需瞬时平衡以及随机因素众多等方面,给大电网安全稳定运行带来了风险和挑战^[1-3]。对大规模复杂电力系统进行元件关键性评估,有利于准确、科学地辨识电网中存在的关键点,从而提前预防控制,防患于未然。

目前,电网关键节点辨识采用的研究方法主要有复杂网络理论^[4-7]、能量函数法^[8-13]以及概率分析^[14]等。文献[4]从复杂网络和网络最大流理论的角度出发,引入传输贡献度评估电网关键节点。文献[5]对已有的电网复杂网络模型进行改进,建立了距离度、能力度等关键环节评估指标集。文献[7]提出了节点电气耦合连接度的概念,并将其用于辨识系统的关键环节。以上研究大多以标准样本系统为基础,而实际系统中不同电压等级的节点和支路在系统中的重要度存在很大差异,如果不考虑电压等级的差异性,会对评估结果造成较大影响,故存在一定的局限性。文献[9-10]通过引入电压等级修正系数对节点脆弱性综合评估指标进行改进。然而,采取定义系统不同电压等级下权重因子的方式存在一定的主观性。

熵反映了一种自然界现象有序程度演化的规律,最初被用来度量系统内部分子运动的混乱程度,后来被逐步推广到信息论、控制论、概率论等不同学科领域中^[15]。目前,熵在电力系统中的应用主要分为2类:一类基于潮流,侧重于对系统运行状态的描述,如潮流转移熵^[16]、潮流分布熵^[17]、效用风险熵^[18]、加权潮流熵^[19]等;另一类基于图论,旨在对系统结构特征进行刻画,如文献[20]构造的结构熵

指标等。以上研究成果体现了熵理论在电力系统安全分析中的广泛应用,然而利用熵理论来描述系统静态电压稳定性的研究还较为欠缺,因此本文建立了电压增长均衡度指标,评估节点负荷扰动给系统静态电压稳定性带来的影响。

本文从泰尔熵理论出发,在计及系统电压等级的基础上,综合考虑电压增长率泰尔熵和加权潮流冲击率泰尔熵来辨识电力系统中的关键节点。首先,将电网各支路、节点按电压等级分类,针对节点负荷扰动后系统电压幅值变化的均衡程度和系统潮流冲击分布的聚集程度,分别建立了电压增长率泰尔熵模型和加权潮流冲击率泰尔熵模型;然后采用二元分析法和熵权法相结合的权重分析方法构建关键节点综合评估指标,从全局角度衡量节点负荷扰动对系统静态电压稳定性和系统潮流分布均匀性造成的影响;最后,通过对 IEEE 30 节点标准系统及西南某地区实际系统进行仿真分析,验证了综合评估指标在复杂电网关键节点识别中的重要作用。

1 泰尔熵理论

泰尔熵标准又称泰尔指数,来源于信息论中熵的概念,最初被用来衡量国家之间的收入差距^[21-22]。在研究不同阶层不同区域之间不均等状况的统计与分析中,泰尔指数的运用相当广泛。

假设一个离散信息源可能发出 m 种不同的信号($A_1, A_2, \dots, A_m$),每种信号发生的概率为 x_i ($i=1, 2, \dots, m$),并且满足:

$$\begin{cases} 0 \leq x_i \leq 1 \\ \sum_{i=1}^m x_i = 1 \end{cases} \quad (1)$$

则该离散系统的信息熵为:

$$H(x) = \sum_{i=1}^m x_i \ln \frac{1}{x_i} \quad (2)$$

由式(2)可知,当所有事件发生的概率均为 $1/m$ 时,熵值达到最大值 $\ln m$,此时系统状态最无序。将系统最大熵 $\ln m$ 减去系统实际熵 $H(x)$ 所得差值定义为泰尔指数,即泰尔熵标准:

$$T = \ln m - H(x) = \sum_{i=1}^m x_i \ln(m x_i) \quad (3)$$

泰尔指数 T 越大说明区域整体差异性越大。

泰尔指标相比于其他衡量区域差异性指标具有可分解特性,且区域分解十分简单。依据电压等级的不同对电网进行分层分区,可以将元件的关键程度评估与其在网络中的重要程度联合考量。此外,对泰尔指数进行一阶分解后,可以将总体不均等分解为组间不均等和组内不均等,不仅能分析组间、组内差异的变化情况,同时也可分析组间、组内差异变化对总体差异变化的贡献程度,为准确定位系统不均等来源提供参考依据。综上,泰尔指标更适用于现代复杂电网不同电压等级水平下的均匀性分析。

2 泰尔熵指数

2.1 电压增长率泰尔熵

现有节点电压稳定性研究仅从全局角度分析系统扰动或者故障情况下电压稳定情况^[23-26],忽略了电力系统内部各节点、各支路电压等级不同的属性。此外,节点电压稳定性研究不仅要量化节点电压的安全水平,还要分析参数变化时的电压变化趋势,而熵作为量化无序性的有效方法,可用于描述节点负荷波动引起系统电压变化的均衡程度。

鉴于此,将泰尔熵理论应用于电力系统网络分析中的电压稳定性研究,能够在考虑系统电压等级的基础上,量化节点电压增长分布的不均衡性,建立考虑电压等级的电压增长均衡度指标,从整体水平上给出电压增长分布合理性的定量描述,该评估方法更加贴合电网的实际运行状态。具体模型如下。

假设节点 i 增加单位负荷,节点 j 的电压幅值变化量为:

$$\Delta V_j^i = |V_j^i - V_j^0| \quad (4)$$

其中, V_j^0 为初始状态下节点 j 的电压幅值; V_j^i 为节点 i 增加单位负荷后节点 j 的电压幅值。

因此,定义节点 j 电压幅值增长率 γ_j^i 为:

$$\gamma_j^i = \frac{\Delta V_j^i}{V_{jN}} \quad (5)$$

其中, V_{jN} 为节点 j 的额定电压。

假设某电力系统有 N 个节点、 L 条支路、 S 个电压等级,电压等级 q 内有 N_q 个节点、 L_q 条支路。则根据泰尔指数的一阶分解公式,该系统的电压增长

率泰尔熵可定义为:

$$T_{Vi} = \sum_{q=1}^S \frac{\gamma_q}{\gamma} T_V + \sum_{q=1}^S \frac{\gamma_q}{\gamma} \ln \frac{\gamma_q/\gamma}{N_q/N} = T_{IV} + T_{BV} \quad (6)$$

$$T_V = \sum_{n=1}^{N_q} \frac{\gamma_{qn}}{\gamma_q} \ln \frac{\gamma_{qn}/\gamma_q}{1/N_q} \quad (7)$$

其中, T_{Vi} 为系统全局电压增长率差异性; T_{IV} 为电压等级内电压增长率差异性; T_{BV} 为电压等级间电压增长率差异性; T_V 为电压等级 q 内的电压增长率差异性; γ_q 为电压等级 q 内的电压增长率之和; γ 为系统总体的电压增长率之和; γ_{qn} 为电压等级 q 内节点 n 的电压增长率。

由泰尔熵标准原理可知,节点电压增长率泰尔熵越小,代表该节点负荷变化对系统电压幅值的影响越均衡地分配到每个节点,系统整体承受该节点负荷变化的能力较强;节点电压增长率泰尔熵越大,代表系统电压增量分布越聚集,系统元件受到较大冲击,系统的安全稳定运行将受到严重威胁,该节点的关键程度越突出。

此外,通过计算 T_{IV} 和 T_{BV} 在 T_{Vi} 中的占比,还能比较当节点负荷变化时电压等级间和电压等级内系统电压变化的差异性对总体电压变化差异性的贡献度,从而快速识别电压增长分布不均衡的来源,及时对系统的敏感环节进行无功补偿,保证系统的安全稳定运行。

2.2 加权潮流冲击率泰尔熵

节点负荷变化不仅造成系统节点电压幅值的波动,同样会引起系统支路传输潮流的变化。潮流分布的均匀性和聚集性对电网连锁故障的产生具有重要影响,潮流熵是决定系统是否进入自组织临界态的重要因素^[27-28]。因此,在考虑系统电压等级的基础上,建立基于熵理论的潮流冲击率泰尔熵模型并应用于电网关键节点识别,具有实际意义及可行性。

系统在正常工况下处于平衡基态,当节点 i 增加单位负荷后,支路 k 的潮流变化量为:

$$\Delta p_k^i = |p_k^i - p_k^0| \quad (8)$$

其中, p_k^0 为支路 k 的初始潮流值; p_k^i 为节点 i 增加单位负荷后支路 k 的潮流值。

此时,支路 k 的潮流冲击率为:

$$\eta_k^i = \frac{\Delta p_k^i}{\sum_{k=1}^L \Delta p_k^i} \quad (9)$$

根据 2.1 节中电压等级的分类,再结合泰尔熵标准原理和传统的潮流熵理论,可定义系统的潮流冲击率泰尔熵一阶分解模型为:

$$T_{Pi} = \sum_{q=1}^S \frac{\eta_q}{\eta} T_P + \sum_{q=1}^S \frac{\eta_q}{\eta} \ln \frac{\eta_q/\eta}{N_q/N} = T_{IP} + T_{BP} \quad (10)$$

$$T_p = \sum_{l=1}^{L_q} \frac{\eta_{ql}}{\eta_q} \ln \frac{\eta_{ql}/\eta_q}{1/N_q} \quad (11)$$

其中, T_{pi} 为系统全局潮流分布差异性; T_{ip} 为电压等级内潮流分布差异性; T_{BP} 为电压等级间潮流分布差异性; T_p 为电压等级 q 内的潮流分布差异性; η_q 为电压等级 q 内的潮流转移冲击率之和; η 为系统总体的潮流转移冲击率之和; η_{ql} 为电压等级 q 内支路 l 的潮流转移冲击率。

T_{pi} 越小, 表示节点 i 遭受单位负荷冲击后系统潮流转移均衡地分配到每条线路上, 各元件受到的冲击大幅减小, 系统发生连锁故障的可能性降低, 系统运行状态越稳定。

然而, 即使节点单位负荷冲击后系统潮流分布均衡, 由于支路负载率大小不一致的事实, 也可能引起某些重载支路潮流越限的情况, 因此, 考虑支路安全约束, 本文采用加权熵模型。运用支路负载率对潮流冲击率泰尔熵进行加权, 在电压等级内部引入各支路负载率, 电压等级间引入该电压等级区域的平均负载率, 则改进后的加权潮流冲击率泰尔熵模型如下:

$$T_{Wpi} = \sum_{q=1}^S \frac{\eta_q}{\eta} T_p + \sum_{q=1}^S \mu_q \frac{\eta_q}{\eta} \ln \frac{\eta_q/\eta}{N_q/N} = T_{WIP} + T_{WBP} \quad (12)$$

$$T_{WP} = \sum_{l=1}^{L_q} \mu_{ql} \frac{\eta_{ql}}{\eta_q} \ln \frac{\eta_{ql}/\eta_q}{1/N_q} \quad (13)$$

其中, μ_q 为电压等级 q 内的平均负载率; μ_{ql} 为电压等级 q 内支路 l 的负载率; T_{WIP} 为电压等级内加权潮流分布差异性; T_{WBP} 为电压等级间加权潮流分布差异性。 T_{Wpi} 越大, 表示系统潮流转移主要聚集在容量裕度较小的支路上, 潮流分布越不均衡, 剩余支路越限故障概率增加, 即该节点负荷受到扰动后对系统安全稳定运行的影响更严重, 该节点在电网中的地位越关键。

2.3 关键节点综合评估指标

电压增长率泰尔熵是为了描述负荷扰动下电压的变化特征而建立的电压增长均衡度指标, 加权潮流冲击率泰尔熵是为了描述潮流的变化特征建立的潮流转移均衡度指标。然而, 无论是电压越限还是潮流过载, 都将极大地降低系统整体安全运行水平。因此, 节点在电网中的关键程度应综合考虑有功、无功的影响, 从全局角度构建关键节点综合评估指标。

定义关键节点综合评估指标如下:

$$C_i = \lambda_1 T_{Vi} + \lambda_2 T_{Wpi} \quad (14)$$

其中, λ_1 、 λ_2 分别为属性 T_{Vi} 、 T_{Wpi} 的综合权重。权重系数的确定需参考文献[29]中基于信息熵的类似机型确定方法。首先依据二元对比的方法为电压增长率泰尔熵指数和加权潮流冲击率泰尔熵指数打分

形成主观权重, 然后基于实验仿真结果, 运用熵的客观权重法形成客观权重, 最后将客观权重和主观权重合成, 得到属性的综合权重 λ_1 、 λ_2 。

C_i 越大, 表示节点 i 负荷变化引起的系统电压增量和潮流增量在系统中分布越聚集, 越容易造成节点电压越限和支路潮流过载, 系统整体承受该节点负荷变化的能力较弱, 该节点在电网中的地位越关键; 反之, C_i 越小, 表示系统电压增量和潮流增量在系统中的分布越均衡, 系统整体承受该节点负荷变化的能力较强, 节点关键程度越不突出。

3 关键节点辨识流程

本文综合考虑节点负荷波动对系统节点电压幅值和支路传输潮流的影响, 提出计及电压等级的电网关键节点辨识模型。辨识过程主要针对系统中的 PQ 节点。关键节点的辨识流程如图 1 所示。

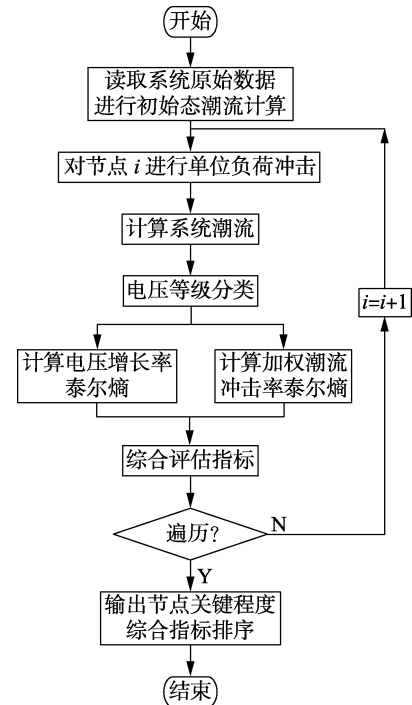


图 1 关键节点综合评估流程图

Fig.1 Flowchart of critical node comprehensive assessment

4 算例仿真

4.1 IEEE 30 节点系统关键节点仿真分析

本文采用 IEEE 30 节点系统作为仿真测试系统, 具体参数见文献[30]。系统节点支路编号见附录中图 A1。由此计算出的系统泰尔熵指数见图 2。

参考文献[29]中属性权重的确定方法, 相较于节点电压增长引发的后果严重度, 支路潮流更容易过载从而导致线路退出运行, 引发系统连锁故障, 因此, 对加权潮流冲击率泰尔熵指数分配了更高的主观权重, 实验计算得出的综合权重指数 $\lambda_1 = 0.685$, $\lambda_2 = 0.315$ 。

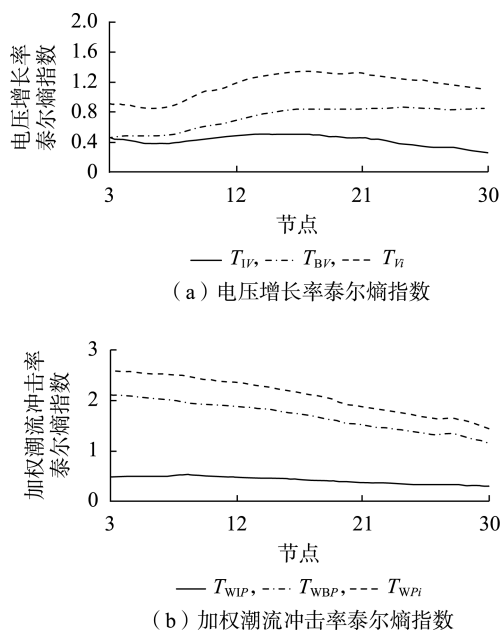


图 2 系统泰尔熵指数

Fig.2 System Theil index

由图 2(a)可见,由于发电机节点拥有强大的无功支撑,能维持节点本身及其附近节点电压的稳定性,因此,靠近发电机侧的联络节点 3、4、6、7 等的电压增长率泰尔熵指数较低,电压波动不明显,而位于负荷中心的节点 16—20 等由于远离发电机,缺乏无功支持,一旦节点负荷加重,系统电压变化呈现明显的区域差异性,因此,这些节点的电压增长率泰尔熵指数较高。由图 2(b)可见,当节点负荷发生大幅波动时,发电机节点需要立刻增加出力以维持全网潮流平衡,此时,联络节点 3、4、6、7 由于承担了较重的变电负荷,受网络潮流变动影响更大,系统潮流分布表现出更大的不平衡性。节点 27—29 属于系统末端节点,不承担向其他节点输送功率的任务,与平衡节点的电气连接较弱,受外界波动的影响不明显,因此加权潮流冲击率泰尔熵指数较低。

结合图 2(a)、(b)可知,当节点负荷变化时,不论是对电压幅值还是对传输潮流的影响,电压等级间泰尔熵指数的贡献率均大于电压等级内部的泰尔熵指数贡献率。由此可知,系统潮流冲击分布和电压增长分布不平衡的主要来源是电压等级之间的差异性。以节点 6 为例,其电压增长率泰尔熵指数为 0.862,而电压等级内的电压增长率泰尔熵为 0.484,占系统总体泰尔熵指数的 56.19%,其加权潮流冲击率泰尔熵指数为 2.547,而电压等级间的加权潮流冲击率增长率泰尔熵指数为 2.056,占系统总体泰尔熵指数的 80.72%。此外,通过对节点电压增长率泰尔熵指数、节点加权潮流冲击率泰尔熵指数的横向对比发现,系统潮流转移冲击分布的不均衡性受电压等级的影响更严重,因此在综合指标的建立中,对加权潮流冲击率泰尔熵指数分配了更高的主观

权重。

通过对节点的关键性综合评估指标进行排序,筛选出如表 1 所示的关键节点。

表 1 IEEE 30 节点系统的关键节点

Table 1 Critical nodes of IEEE 30-bus system

排序	电压增长率 泰尔熵	加权潮流 冲击率泰尔熵	综合指标	节点
1	0.827 7	0.758 1	0.780 0	15
2	0.924 6	0.711 1	0.778 3	16
3	0.692 9	0.800 8	0.766 8	14
4	0.183 8	1.000 0	0.742 9	3
5	0.516 3	0.839 9	0.738 0	12
6	0.123 6	0.986 0	0.714 3	6
7	0.154 4	0.945 6	0.696 4	4
8	0.165 4	0.928 6	0.688 2	9
9	0.931 7	0.569 6	0.683 7	17
10	0.311 1	0.850 9	0.680 8	10

从表 1 可以看出,排序前 3 的节点 15、16、14 主要集中在电网中部区域,说明该区域在系统中较为关键,需要运行人员重点关注。排序前 10 的节点基本上处于负荷中心或者紧邻发电机,承担着向电网末端传输功率的主要任务,若这些节点负荷发生扰动,引起的潮流转移和电压增长将在系统中聚集,导致网络运行状态的逐步恶化。以节点 6 为例进行说明,节点 6 为主干变压器支路节点,承担着向系统注入电能的重要任务,尽管该节点的电压增长率泰尔熵指数较低,然而其加权潮流冲击率泰尔熵指数为 0.986 0,若该节点发生负荷扰动,全网将发生较大规模的潮流转移,加重剩余节点和支路的负担,因此,综合考虑可知该节点是送端的关键节点。

为进一步验证本文方法的合理性和有效性,将本文评估结果与综合判别节点关键程度的文献[9]和文献[31]对比,结果如表 2 所示。

表 2 关键节点辨识结果比较

Table 2 Comparison of identification results of critical nodes

排序	关键节点		
	本文方法	文献[9]方法	文献[31]方法
1	15	13	6
2	16	11	4
3	14	14	10
4	3	9	2
5	12	15	12
6	6	16	9
7	4	6	15
8	9	10	7
9	17	12	5
10	10	3	3

由表 2 可知,本文评估方法中前 10 个关键节点中有 8 个关键节点和文献[9]方法重合,有 7 个关键节点和文献[31]方法重合,验证了本文方法的合理性。本文方法与另外 2 种方法的区别主要是关键节点的排序有所不同,这是因为本文考虑了系统电压

等级不同的属性,并且辨识指标的侧重点和权重处理方式存在差异。以排序变化较大的节点 15、16、14 为例进行分析,可以确定这 3 个节点均位于电网中部,远离发电机节点,缺乏一定的无功支撑,当节点负荷加重时,系统电压变化强烈,这些节点的电压增长率泰尔熵指数较高,并且注入功率除满足自带负荷外,为了满足系统电力电量平衡,还承担着向电网末端传输功率的任务,因此潮流的波动也相对明显,节点加权潮流冲击率泰尔熵较大,整体比其他节点表现出更高的重要性。

此外,通过实验仿真数据结果可知,节点 15 电压等级间的电压增长率泰尔熵指数为 0.755,约占系统泰尔熵指数的 59.87%,电压等级间的加权潮流冲击率泰尔熵指数为 1.848,约占系统泰尔熵指数的 79.90%,表明当该节点发生负荷波动时,系统电压增长分布和潮流转移分布的不均衡度主要来源于不同电压等级间的差异性。

综上可见,本文建立的关键节点综合评估指标从系统有功和无功两方面系统表征了节点的关键程度,并且能有效地识别发生负荷扰动后电网节点电压幅值和支路传输潮流不均衡度的主要来源,对实际应用更具指导意义。

4.2 实际系统关键节点仿真分析

为了验证本文关键节点辨识模型的实用性,对西南某地区电网枯水期运行状态进行仿真分析。该地区系统的网络拓扑图见附录中图 A2。

运用第 2 节中构建的关键节点综合评估指标对系统中的所有 PQ 节点进行排序,辨识出该电网最关键的 10 个节点,排序结果如表 3 所示。

表 3 西南某地区实际电网关键节点辨识结果

Table 3 Identification results of critical nodes for a real power network in southwest area

排序	节点	综合指标	排序	节点	综合指标
1	2	0.983 6	6	9	0.572 0
2	4	0.962 0	7	14	0.532 3
3	8	0.939 8	8	10	0.527 5
4	3	0.873 6	9	15	0.502 6
5	6	0.613 7	10	18	0.480 2

从表 3 可以看出,该电网关键程度排序前 4 的节点 2(110 kV)、4(110 kV)、8(110 kV)、3(110 kV)连接起来构成了本区域的 110 kV 主干输电网,联络着该地区各发电中心和负荷中心,承担着区域电网电能输送以及与主网互联互通的重要任务。如果这些关键节点发生负荷扰动,系统的电压增长与潮流转移均将在电网中产生较大程度的聚集,严重时元件将退出运行,区域电网相互分离,形成孤网,对电网影响很大。节点 6(110 kV)、9(35 kV)、14(35 kV)、10(35 kV)均为带负荷的变压器高低压侧节点,该类节点在电网中地位很关键,究其原因,一方

面该类节点与配电网联系紧密,相较于输电网而言,配电网运行状况和元件分布更为复杂,故上述站点更易受配电网负荷扰动的影响;另一方面该类节点承担的负荷量较重,且距离主网较远,缺乏无功补偿,因此需要运行人员重点关注。

综上所述,地区实际电网的仿真证明了本文所建立模型的实用性。

5 结论

本文从负荷变化对系统节点电压幅值和支路传输潮流的影响机理出发,构建了关键节点综合评估指标并验证了该指标的有效性,得到以下结论:

a. 传统关键节点评估中未能有效考虑系统电压等级的问题,本文结合泰尔熵指数的可分解特性,基于电压等级提出了电压增长率泰尔熵模型和加权潮流冲击率泰尔熵模型,更加符合电力系统实际运行规律;

b. 现有的电压稳定性评估中主要是电压稳定极限及裕度的计算,本文将熵理论引入电压静态稳定性评估中,建立电压增长均衡度指标,使节点电压幅值变化的均衡程度得以量化;

c. 本文引入支路负载率,采用加权熵模型对未考虑支路安全约束的潮流冲击率泰尔熵模型进行改进,定义加权潮流冲击率泰尔熵模型,使指标结果更加贴合实际;

d. 本文所提指标基于基本的静态潮流,方法便捷,思路清晰,所得关键性指标可直观地进行定量分析,有助于工作人员高效地识别系统的关键节点。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 梅生伟,薛安成,张雪敏. 电力系统自组织临界特性与大电网安全[M]. 北京:清华大学出版社,2009:1-6.
- [2] MEI S,ZHANG X,CAO M. Power grid complexity[M]. Beijing, China:Tsinghua University Press,2011:1-7.
- [3] ZHANG Ning,KANG Chongqing,LIU Jingkun,et al. Mid short-term risk assessment of power systems considering impact of external environment[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013,1(2):118-126.
- [4] 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 Yinrong. 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.
- [5] 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.
- [6] 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):144-149,156.

- 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, 156.
- [7] 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.
- [8] 刘沛清, 李华强, 赵阳, 等. 考虑元件综合重要度的电网安全性风险评估方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 132-138, 144.
- LIU Peiqing, LI Huaqiang, ZHAO Yang, et al. Power grid security risk assessment considering comprehensive element importance index[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 132-138, 144.
- [9] 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]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 136-141.
- [10] 蔡晔, 曹一家, 李勇, 等. 考虑电压等级和运行状态的电网脆弱线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2124-2131.
- CAI Ye, CAO Yijia, LI Yong, et al. Identification of vulnerable lines in urban power grid based on voltage grade and running state[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2124-2131.
- [11] 王炫丹, 李华强, 廖烽然, 等. 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[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 82-88, 125.
- WANG Xuandan, LI Huaqiang, LIAO Fengran, et al. Critical node identification of power grid based on voltage anti-interference factors and comprehensive influence factors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 82-88, 125.
- [12] 刘群英, 刘俊勇, 刘起方. 基于能量信息的电压稳定性量化指标研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(8): 8-13.
- LIU Qunying, LIU Junyong, LIU Qifang. Quantification index of voltage stability based on energy information[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(8): 8-13.
- [13] 魏震波, 刘俊勇, 朱国俊, 等. 电力系统脆弱性理论研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 38-43.
- WEI Zhenbo, LIU Junyong, ZHU Guojun, et al. Power system vulnerability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 38-43.
- [14] 陈为化, 江全元, 曹一家. 基于风险理论和模糊推理的电压脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 20-25.
- CHEN Weihua, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Voltage vulnerability assessment based on risk theory and fuzzy reasoning[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 20-25.
- [15] 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.
- [16] 李勇, 刘俊勇, 刘晓宇, 等. 基于潮流熵测度的连锁故障脆弱线路评估及其在四川主干电网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 40-46.
- LI Yong, LIU Junyong, LIU Xiaoyu, et al. Vulnerability assessment based on power flow entropy for lines in cascading failures and its application in Sichuan backbone power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 40-46.
- [17] 慕宗江, 徐岩, 仇向东, 等. 基于潮流熵的继电保护定值在线校核评估方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 170-174.
- MU Zongjiang, XU Yan, QIU Xiangdong, et al. Online protection setting assessment based on power flow entropy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 170-174.
- [18] 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.
- [19] 刘文颖, 蔡万通, 张宁, 等. 基于联合加权熵的电网自组织临界状态演化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1363-1370.
- LIU Wenying, CAI Wantong, ZHANG Ning, et al. Evolution of self-organizing of grid critical state based on united weighted entropy theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1363-1370.
- [20] 莫一夫, 叶琳浩, 张勇军. 基于多维结构熵的智能电网信息系统复杂性评估[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 117-122.
- MO Yifu, YE Linhao, ZHANG Yongjun. Complexity evaluation of smart grid information management system based on multi-dimensional structure entropy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 117-122.
- [21] 于成学. 中国区域经济差异的泰尔指数多指标测度研究[J]. 华东经济管理, 2009, 23(7): 40-44.
- YU Chengxue. Research on the Theil multi-indicators measurement for the divergences of regional economy of China[J]. East China Economic Management, 2009, 23(7): 40-44.
- [22] 唐建荣, 王清慧. 基于泰尔熵指数的区域碳排放差异研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2013, 15(4): 21-27.
- TANG Jianrong, WANG Qinghui. An analysis on the differences of regional carbon emission in China based on Theil index[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2013, 15(4): 21-27.
- [23] 杨悦, 李国庆, 王振浩. 基于可信性理论的含风电电力系统电压稳定概率评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(12): 6-12.
- YANG Yue, LI Guoqing, WANG Zhenhao. Probabilistic voltage stability assessment based on credibility theory for power system with wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12): 6-12.
- [24] 户秀琼, 颜伟, 余娟, 等. 静态电压稳定预防控制的风险评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 65-70, 97.
- HU Xiujiong, YAN Wei, YU Juan, et al. Risk assessment for preventive control of static voltage stability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 65-70, 97.
- [25] 杨欢欢, 蔡泽祥, 朱林, 等. 直流系统无功动态特性及其对受端电网暂态电压稳定的影响[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 86-92.
- YANG Huanhuan, CAI Zexiang, ZHU Lin, et al. Dynamic characteristic of HVDC reactive power and its influence on transient voltage stability of receiving-end power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 86-92.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 但扬清, 刘文颖, 朱艳伟, 等. 含大规模风电集中接入的电网自组织临界态辨识[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 127-133.
DAN Yangqing, LIU Wenyong, ZHU Yanwei, et al. Self-organized critical state identification of power grid with centralized integration of large-scale wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 127-133.
- [29] 杨卫东, 刘若晨, 蔡景. 属性权重确定方式及在衡量机型相似度中的应用[J]. 飞机设计, 2014, 34(5): 58-61.
YANG Weidong, LIU Ruochen, CAI Jing. The approach to weight determination and its application in measurement of similarity between aircraft[J]. Aircraft Design, 2014, 34(5): 58-61.
- [30] University of Washington Electrical Engineering. 30 bus power flow-test case[EB/OL]. (1993-08-15)[2014-08-20]. http://www.ee.Washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm.
- [31] 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.

作者简介:



刘美君

刘美君(1993—),女,四川成都人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统脆弱性评估(E-mail: 564851778@qq.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: lihuaqiang@scu.edu.cn)。

Critical node identification of power grid considering voltage level

LIU Meijun¹, LIU Jilong², LI Huaqiang¹, ZHANG Hongli³, CHEN Yuqing⁴, LUO Yide⁵

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

2. State Grid Binzhou Electric Power Supply Company, Binzhou 256600, China;

3. State Grid Xuzhou Electric Power Supply Company, Xuzhou 221005, China;

4. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, China;

5. State Grid Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Nanjing 211100, China)

Abstract: Based on the basic principle of Theil's entropy measure and system voltage level, a critical node identification method is proposed for power grid, which comprehensively considers the node static voltage stability and distribution equilibrium of branch transfer power flow. According to the influence mechanism of load variation on system voltage amplitude growth and transmission power flow variation, the Theil's entropy model of voltage growth rate and the Theil's entropy model of weighted flow impact rate are built to describe the equilibrium of system voltage growth and power flow variation. The weight analysis method combined with binary feature analysis method and entropy weight method is adopted to integrate the indexes, and thus the comprehensive evaluation index with the consideration of both the subjective preferences and the objective data is obtained to accurately identify the critical node. The simulation results of IEEE 30-bus system and a real regional southwest power system verify the validity of the proposed model.

Key words: voltage growth rate; weighted flow impact rate; voltage level; Thiel's entropy; difference within group; difference between groups

(上接第50页 continued from page 50)

Low-frequency oscillation suppression using flexible DC grid based on state feedback supplementary damping control

NI Binye, XIANG Wang, LU Xiaojun, WEN Jinyu

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To improve the dynamic stability of AC/DC interconnected system, an approach that uses VSC-MTDC (Voltage Source Converter based Multi-Terminal Direct Current) to damp low-frequency oscillations is proposed. The oscillation mode of AC/DC system is analyzed, and the influences of DC grids on the stability of AC grids are studied. Based on the modal analysis, supplementary damping controller of VSC-MTDC is designed. This controller can output supplementary control signals and regulate the active power of each converter during oscillation to suppress the system oscillation. Simulations are carried on New England 10-machine power system with four-terminal DC grid. Test results indicate that the proposed controller damps the low-frequency oscillation and improves the system dynamic performance.

Key words: DC grid; low-frequency oscillation; AC/DC interconnected system; small-signal analysis; supplementary damping control

附录:

一. IEEE 30 节点系统网络结构图

该系统共含有 24 个 PQ 节点，5 个 PV 节点，节点 1 为平衡节点。此外，系统分为 2 个电压等级：变压器支路的高压侧，额定电压为 132 kV；变压器支路的低压侧，额定电压为 33 kV。

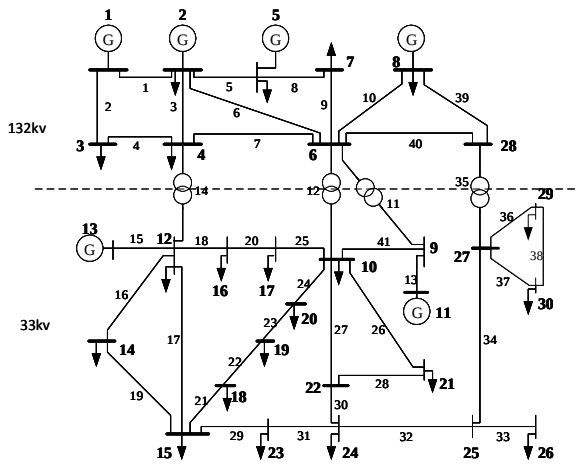


图 A1 IEEE 30 节点系统网络结构图

Fig.A1 Structure of IEEE 30-bus system

二. 西南某地区实际电网网架结构拓扑图

该输电网分为 110 kV 和 35 kV 2 个电压等级，共有 17 个 PQ 节点，3 个 PV 节点，其中 1 号节点为平衡节点。

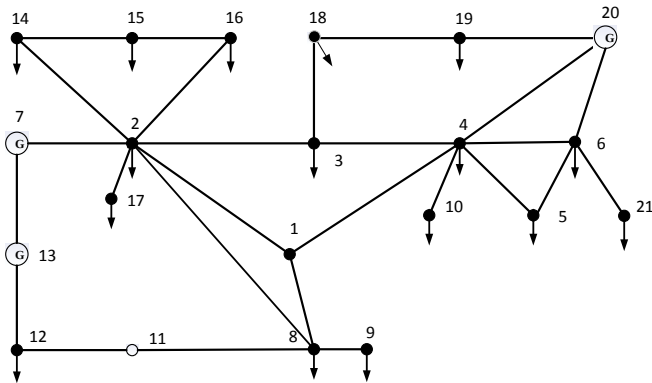


图 A2 西南某地区实际电网网架结构拓扑图

Fig.A2 Topology of a real power grid in southwest area