

考虑配电网故障重构的电压薄弱节点辨识方法

杨隽雯^{1,2}, 尚磊^{1,2}, 叶欣智³, 刘承锡^{1,2}, 董旭柱^{1,2}

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072;

2. 交直流智能配电网湖北省工程中心, 湖北 武汉 430072;

3. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏 南京 210008)

摘要:在建设新型配电系统的背景下,电压越限问题逐渐突出,系统稳定运行日趋复杂。文中基于全纯嵌入法,研究拓扑变化下节点电压指标轨迹的偏移特性,提出考虑配电网故障重构的薄弱节点辨识方法。首先,基于电力系统解耦的思想提出节点电压指标与配电网电压可视化安全域;然后,通过全纯嵌入法求解出节点电压指标轨迹,定义电压指标偏移距离表征节点电压指标轨迹特性,计及配电网故障后的拓扑变化提出概率性节点电压指标轨迹求解方法;最后,综合配电网正常态工况与 $N-1+1$ 故障态运行工况,根据配电网电压可视化安全域与节点电压指标轨迹的相对位置关系,构建配电网薄弱节点评价指标体系,提出薄弱节点辨识方法。基于IEEE 33节点配电系统进行分析,结果表明,所提方法可实现节点电压状态的可视化监测,准确辨识电压薄弱节点。

关键词:全纯嵌入法;薄弱节点;故障重构;节点电压指标;电压安全域;电压稳定边界

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)01-0039-11

0 引言

“双碳”目标下,配电系统逐渐发展为具有电能汇集、传输、存储和交易功能的新型区域电力系统,具有新的形态和特征^[1]。在我国电力需求快速增长的背景下,受分布式电源出力的不确定性、随机性与波动性影响,电力供需匹配问题日益突出,导致配电网潮流分布不合理,系统电压越限和稳定性问题愈加显著^[2]。尽管当前配电网尚未出现电压崩溃问题,但其电压稳定性仍面临一定风险。而在配电网实际运行过程中,电压失稳导致的严重故障往往是由某一个薄弱环节引发的连锁效应^[3-4]。因此,快速、准确评估电网运行态势并辨识电压薄弱节点,对确保配电系统安全稳定运行意义重大。

目前,电网薄弱环节辨识的研究主要针对主网开展,其研究方法可分为三大类:基于网络拓扑特性的方法、基于电网运行特性的方法、基于数据驱动的方法。基于网络拓扑特性的方法以复杂网络理论为基础,从图的角度研究电网拓扑特征,构建脆弱性指标体系,实现对电网薄弱环节的辨识^[5-9]。由于该方法将电网结构抽象为图,模型中缺乏电力系统负荷状态等电气量的物理运行特性,因此存在一定的局限性。基于电网运行特性的方法大多通过计算电网关键电气量,分析系统潮流分布与电压稳定状况,从而辨识电网薄弱节点^[10-13],但该方法

所用潮流计算的速度与收敛性将会限制其实际效果。基于数据驱动的方法无需电网传统的机理建模,而是通过数据分析直接挖掘电网运行数据中的隐含规律与模式。国内外众多学者从随机矩阵理论方法^[14-17]、人工智能方法^[18-19]出发开展了一系列研究,避免了传统分析方法在构建精确物理模型时所遇到的困难,但其分析结果的可解释性相对较弱,且配电网量测数据的质量问题难以解决。

电压相量是电网动态行为最直观的变量,在电网时空运动行为中,其轨迹是母线电压相量在复空间内的有向轨迹,蕴含着丰富的运动特性信息^[20]。文献[20-21]分析多时空断面下相量轨迹的运动情况,挖掘相量轨迹的几何特征并研究电压相量的偏移特性,实现了节点时空关联特性分析与运动态势评估。

从电压相量轨迹的角度出发,有学者基于全纯嵌入理论提出了节点电压指标法^[22],构建表征节点电压特性的复数型电压指标,将节点电压指标与电压稳定边界映射到同一复平面内,从而辨识电压薄弱节点。其中,全纯嵌入法(holomorphic embedding method, HEM)是一种非迭代型的潮流计算方法^[23],其不依赖于初值选取且收敛性强。文献[22]提出的节点电压指标法通过界定指标与电压稳定边界之间的距离来定量反映节点电压薄弱性,但忽略了节点电压指标随相角变化的特征^[24]。文献[25-26]在构建节点电压安全域的基础上进一步研究节点电压指标轨迹(voltage index trajectory, VIT)的变化

趋势,提出了面向未来运行环境的电压薄弱节点可视化辨识方法。目前,关于节点电压指标法的相关研究均针对固定的网络拓扑开展,尚未涉及配电网线路故障场景下的薄弱节点辨识,也未考虑故障重构对薄弱节点辨识的影响。

总而言之,当前已开展的电网薄弱节点辨识的研究大多面向大电网,较少将配电网薄弱节点辨识作为一个单独的课题展开研究。因此,文中引入基于HEM的节点电压指标法,提出考虑配电网故障重构的VIT求解方法,以实现节点电压状态可视化监测与配电网安全薄弱节点辨识。首先,基于配电网解耦的思想详细推导并构建了节点电压指标与配电网可视化电压安全域(distribution network visible voltage safety region, DVVSR);然后,利用物理性HEM推导求解节点电压指标的解析表达式,在此基础上提出考虑配电网重构后网络拓扑变化的VIT快速求解方法;最后,以台风场景为例进行线路故障建模,计及配电网N-1+1故障态运行工况构建配电网薄弱节点辨识指标体系,提出配电网线路N-1故障下转供方案选取策略与薄弱节点辨识方法,并基于改进的IEEE 33节点配电网验证了文中所提方法的有效性和准确性。

1 DVVSR

电力系统中潮流方程的解析解只针对两节点系统严格存在^[27],基于解耦的思想可将配电网解耦为若干个两节点系统,可以得到电压稳定边界^[25-26]。同时,配电网的电压越限问题日益突出,尤其是重载运行时的电压越下限问题与高渗透率分布式电源带来的电压越上限问题^[28],因此除了关注电压是否稳定之外,还需要聚焦于电压是否越限。文中构建节点电压指标,结合电压稳定边界与节点电压越限约束,推导指标与可行解之间的关系并由此得到DVVSR。

电力解耦模型如图1所示。根据文献[25]所述方法可得到节点电压指标与节点电压可解条件。其中节点电压指标为:

$$\begin{cases} \bar{U}_i = 1 + \frac{\sigma_i}{\bar{U}_i^*} \\ \sigma_i = \frac{Z_i S_i^*}{|U_0|^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: \bar{U}_i 为归一化后节点*i*的电压; σ_i 为节点*i*的电压指标; Z_i 为节点*i*与平衡节点之间的虚拟支路阻抗, $Z_i = R_i + jX_i$, R_i 、 X_i 分别为虚拟支路的电阻和电

抗; S_i^* 、 \bar{U}_i^* 分别为 S_i 、 \bar{U}_i 的共轭复数,其中 S_i 为节点*i*的复功率, $S_i = P_i + jQ_i$, P_i 、 Q_i 分别为节点*i*处注入的有功功率和无功功率; U_0 为平衡节点电压,|·|表示变量幅值。

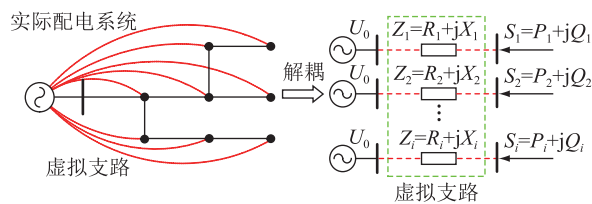


图1 构建虚拟支路进行配电系统解耦

Fig.1 Constructing virtual branches for decoupling distribution networks

节点电压的可解条件^[25]为:

$$\Delta = 1 + 4\sigma_{ir} - 4\sigma_{il}^2 \geq 0 \quad (2)$$

可得:

$$\sigma_{il}^2 - \sigma_{ir} - \frac{1}{4} \leq 0 \quad (3)$$

式中: σ_{ir} 、 σ_{il} 分别为电压指标 σ_i 的实部和虚部。

由式(3)可得到 σ 复平面内的一个抛物线边界,将其视为电压稳定边界,如图2所示。当节点电压指标 σ_i 位于抛物线边界内部时,潮流方程存在可行的电压解;而当节点电压指标 σ_i 位于抛物线边界外部时,节点电压 \bar{U}_i 无解,即出现电压崩溃。

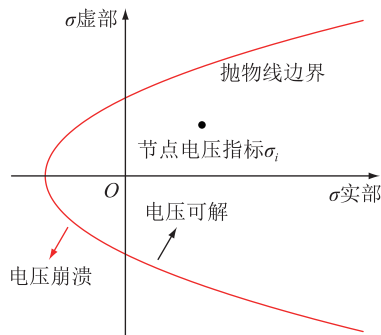


图2 抛物线型电压稳定边界与节点电压指标 σ_i

Fig.2 Parabolic voltage stability boundary and node voltage index σ_i

基于电压稳定边界,进一步对电压上下限约束下的DVVSR进行推导。设平衡节点的电压相角为0,根据 $U_{ir}^2 + U_{il}^2 = |U_i|^2$ 和 $|U_0| = U_0$,将电压指标的实部、虚部展开并整理,可得:

$$\begin{cases} \sigma_{ir} - \frac{|U_i|^2}{U_0^2} = -\frac{U_{ir}}{U_0} \\ \sigma_{il} = \frac{U_{il}}{U_0} \end{cases} \quad (4)$$

式中: U_i 为节点*i*的电压; U_{ir} 、 U_{il} 分别为节点电压 U_i 的实部和虚部。

对式(4)中的上、下两式进行平方和求解,可得式(5)所示的圆方程,该圆的圆心为 $(|U_i|^2/U_0^2, 0)$ 、半径为 $|U_i|/U_0$ 。

$$(\sigma_{\text{IR}} - |U_i|^2/U_0^2)^2 + \sigma_{\text{II}}^2 = |U_i|^2/U_0^2 \quad (5)$$

同时,将式(5)代入式(3),易知圆内切于抛物线。

由式(5)可知,不同的节点电压幅值 $|U_i|$ 对应不同的抛物线内切圆,即假定 σ 复平面内某个内切圆对应节点电压幅值为 X ,那么当且仅当 σ_i 恰好位于该圆上才能表示 $|U_i|=X$ 。因此,配电网电压的上限 U_H 与下限 U_L 可以分别在该 σ 复平面上映射为唯一的内切圆,这2个内切圆将会形成一个区域,且在此区域内,所有内切圆对应的节点电压幅值 $|U_i|$ 均满足 $U_L \leq |U_i| \leq U_H$ 。由此,可以将该区域定义为电压安全域^[26,29],如图3所示。

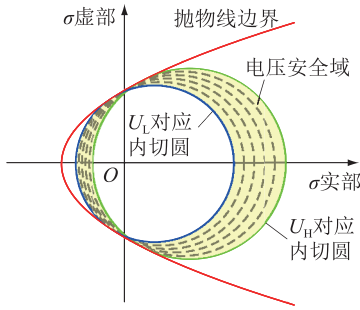


图3 DVVSR 示意

Fig.3 Schematic diagram of DVVSR

系统运行环境的变化使得各个节点电压指标 σ_i 在复平面内产生变化轨迹,轨迹中先穿过电压安全域边界的节点即可被识别为预期负荷增长方向下的配电网安全薄弱节点。

2 配电网节点 VIT 求解

为求解上文所构建的节点电压指标 σ_i ,文中引入 HEM,采用物理性 HEM^[30]进行配电网潮流计算,从而进一步求解 VIT。

2.1 配电网全纯嵌入潮流计算

HEM 的核心在于,通过传统潮流方程待求量(节点电压、发电机无功出力等)中嵌入一个复变量 s ,将非线性方程组的求解问题转化为隐式全纯函数的求解问题。全纯函数的基本概念及构造条件参考文献[25],文中不再赘述。

文中采用文献[30]提出的物理性 HEM 交流潮流计算模型,在系统负荷状态发生变化(仅指系统负荷节点的负荷统一变化)后,无须再次对模型求得的待求量进行潮流计算即可得到潮流结果。具体而言,当 $s=0$ 和 $s=1$ 时 HEM 分别对应系统的平

启动初始状态与实际运行状态,而 HEM 中的嵌入因子 s 在取其他值时仍具有物理意义,可表示系统中全部负荷节点状态的统一变化方向,即假设全网负荷统一按嵌入因子 s 增大或减小。

建立含 N 个节点的电力系统的物理性 HEM 交流潮流计算模型,如式(6)~式(8)所示,系统中仅考虑恒功率负荷。

$$U_i(s) = U_0 \quad \forall i \in S_{\text{Slack}} \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^N Y_{ik} U_k(s) = \frac{s(P_i - jQ_i)}{U_i^*(s^*)} \quad \forall i \in S_{PQ} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^N Y_{ik} U_k(s) = \frac{(P_{gi} - jQ_{gi}) - jQ_i(s)}{U_i^*(s^*)} \\ U_i(s) U_i^*(s^*) = |U_{gi}|^2 + (|U_i^{\text{sp}}|^2 - |U_{gi}|^2)s \end{cases} \quad \forall i \in S_{PV} \quad (8)$$

式中: $U_i(s)$ 、 $Q_i(s)$ 分别为节点电压和发电机无功出力关于 s 的幂级数展开式; S_{Slack} 为平衡节点的集合; Y_{ik} 为节点导纳矩阵中节点 i 、 k 之间的互导纳; $U_k(s)$ 为节点 i 的相邻节点 k 的电压幂级数; $U_i^*(s^*)$ 为 $U_i(s)$ 的共轭复数; S_{PQ} 为 PQ 节点的集合; U_{gi} 、 Q_{gi} 分别为节点 i 待求变量 $U_i(s)$ 和 $Q_i(s)$ 的幂级数第一项系数,即有物理意义的初始解; P_{gi} 为 PV 节点 i 原工况下给定的有功功率; U_i^{sp} 为 PV 节点 i 的指定电压; S_{PV} 为 PV 节点的集合。

潮流模型的求解过程可分为两步:(1)求解待求变量 $U_i(s)$ 和 $Q_i(s)$ 的幂级数第一项系数,作为递归的初始解;(2)将求得的 U_{gi} 、 Q_{gi} 代入式(6)~式(8)进行递归求解,得到幂级数各阶系数的解。具体求解过程与非物理性 HEM 类似,但其解具有物理意义。

2.2 节点电压指标幂级数推导

式(3)给出了复数型节点电压指标 σ_i 的求解式,为方便计算系统负荷状态变化时的节点电压指标,采用 HEM 对其进行求解。文中采用文献[25]所提的物理性嵌入方式可得:

$$\bar{U}_i(s) = 1 + \frac{\sigma_i(s)}{\bar{U}_i^*(s^*)} \quad (9)$$

式中:归一化节点电压 $\bar{U}_i(s)$ 和节点电压指标 $\sigma_i(s)$ 为幂级数形式的全纯函数; $\bar{U}_i^*(s^*)$ 为 $\bar{U}_i(s)$ 的共轭复数。

假定平衡节点的电压幅值为 1 p.u.、相角为 0,则 $\bar{U}_i(s) = U_i(s)/U_0 = U_i(s)$,利用上文所述 HEM 进行潮流计算,在得到幂级数形式的节点电压解析表达式后即可根据式(9)得到节点电压指标 $\sigma_i(s)$ 。

$$\sigma_i(s) = \sum_{n=0}^{\infty} \sigma_i[n]s^n \quad (10)$$

式中： $\sigma_i[n]$ 为 $\sigma_i(s)$ 的 n 阶幂级数系数。

由于求解节点电压 $U_i(s)$ 采用物理性HEM,且节点电压指标 $\sigma_i(s)$ 也采用物理性嵌入形式,故最终 $\sigma_i(s)$ 在 s 取值不同时均存在物理意义。通过 $\sigma_i(s)$ 的变化,可以得到节点电压指标随系统负荷状态变化的轨迹。

对于在同一个 σ 复平面内的节点电压指标与电压安全域,可根据节点电压指标与电压安全边界的相对位置监测节点电压安全状态,辨识薄弱节点。

2.3 计及拓扑变化的VIT求解

配电网“闭环设计、开环运行”的方式不同于输电网,因此无法直接沿用输电网的 $N-1$ 校验原则。在输电网模拟断开某一线路后,潮流上该线路的下游线路将全部失电,这显然与配电网的运行情况不符。故有学者充分考虑配电网拓扑的灵活性,提出了配电网的 $N-1+1$ 安全准则,即当配电网中某一线路故障断开时,闭合系统中的某一条联络线对失电区域进行恢复供电。拓扑变化会引起节点电压改变,进而导致节点电压指标偏移,影响对薄弱节点的辨识。基于此,文中提出考虑拓扑变化的VIT快速求解方法。

2.3.1 节点电压指标偏移距离定义

考虑配电网网络拓扑多变的特点,文中提出节点电压指标偏移距离,定义为:

$$D_{i,jl} = (\sigma_{iR} - \sigma_{iR,jl}) + j(\sigma_{iI} - \sigma_{iI,jl}) \quad (11)$$

式中: $D_{i,jl}$ 为线路 j 故障断开、联络线 l 闭合时节点 i 电压指标在 σ 复平面内的偏移距离; $\sigma_{iR,jl}$ 、 $\sigma_{iI,jl}$ 分别为线路 j 故障断开、联络线 l 闭合时在系统初始状态下节点 i 电压指标的实部和虚部。

当系统处于重载状态时,网络拓扑变化会导致节点电压稳定性发生较大变化,对应节点电压指标 σ_i 也将出现更大偏移。因此,考虑到系统负荷的增长,将2.1节中的复变量 s 作为偏移距离缩放系数,则节点电压指标动态偏移距离 $D_{i,jl,s}$ 的计算为:

$$D_{i,jl,s} = s[(\sigma_{iR} - \sigma_{iR,jl}) + j(\sigma_{iI} - \sigma_{iI,jl})] \quad (12)$$

2.3.2 VIT偏移求解

结合配电网实时故障率,文中进一步提出了概率化节点电压指标轨迹(probabilistic voltage index trajectory, PVIT),如图4所示,图中将不同线路故障转供方案下的节点电压指标偏移距离绘制于同一复平面内,偏移后节点电压指标 σ_i 的不同颜色表示不同线路故障的概率。

配电网故障时,由于联络线的转供,系统会形

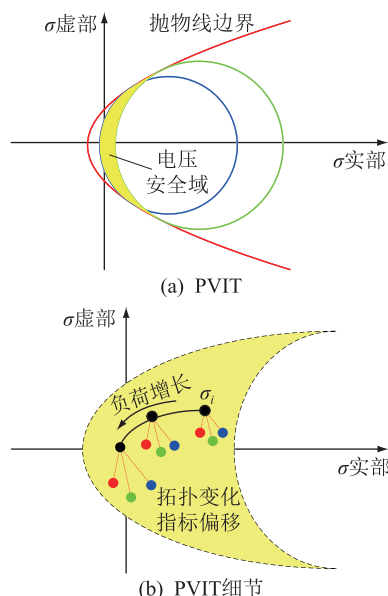


图4 考虑拓扑变化的VIT偏移距离示意
Fig.4 Schematic diagram of VIT deviation considering topological changes

成一系列新的拓扑。针对此类情况,首先,求解拓扑变化前后的节点电压指标偏移距离;然后,利用系统初始状态所求幂级数形式的节点电压指标解析表达式,缩放嵌入因子 s 求得负荷状态变化VIT,再添加节点电压指标偏移距离即可求得拓扑变化VIT;最后,不同的线路故障对应产生不同的拓扑变化VIT,将其绘制在一起可得到PVIT。根据PVIT与电压安全边界的相对位置即可辨识预期负荷增长方式下考虑拓扑变化的薄弱节点。

PVIT快速求解的具体方法如图5所示,主要分为3个阶段。(1)阶段1:在初始负荷状态下运用HEM进行潮流计算,得到初始状态下的节点电压 $U_i(s)$,再根据式(9)、式(10)推导出幂级数形式的节点电压指标 $\sigma_i(s)$ 。(2)阶段2:首先,假定线路 j 故障断开,根据负荷转供方案闭合联络线 l 对失电区域进行恢复供电;接着,在初始负荷状态下,根据新的网络拓扑修改节点导纳矩阵,并使用HEM进行潮流计算,求解得到系统 $N-1+1$ 运行方式下的节点电压与节点电压指标;最后,在 σ 复平面内,根据式(12)计算节点电压指标在拓扑变化前后的动态偏移距离 $D_{i,jl,s}$ 并保存。(3)阶段3:对系统初始负荷状态下求得的节点电压指标 $\sigma_i(s)$ 中的嵌入因子 s 进行统一缩放得到VIT,再叠加不同网络拓扑对应的节点电压指标动态偏移距离得到PVIT,从而实现考虑配电网故障后网络拓扑变化的VIT快速求解。

实际应用时,由于拓扑之间的切换存在固定组合,为提高响应速度,可事先计算不同拓扑变化下的节点电压指标偏移距离并保存。当故障发生,实

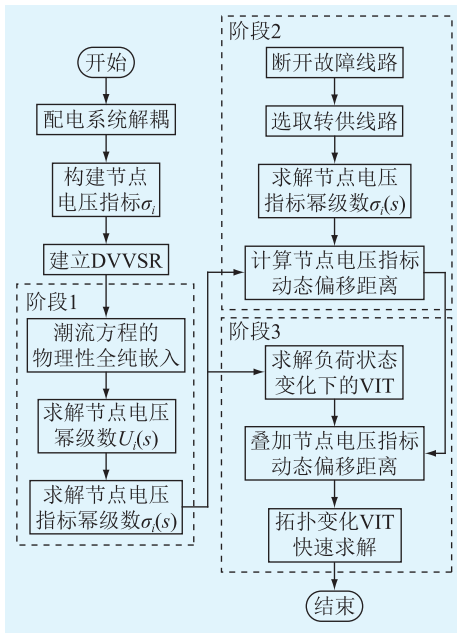


图5 PVIT快速求解方法的流程

Fig.5 Flow chart of a fast solution method for PVIT

际网络拓扑改变时,无须求解拓扑变化后的VIT,仅基于当前的负荷状态与事前保存的电压指标偏移距离即可快速求解实时的VIT,从而监测节点电压安全状态,有效缩短计算时间。

3 考虑配电网故障重构的薄弱环节辨识

3.1 配电网线路故障率建模

文中选择台风天气作为典型故障场景,计算台风天气影响下的配电网线路故障率,构建配电网线路故障模型。选择实际工程中应用较为广泛的Batts台风模型^[31]模拟台风行进过程,具体为:

$$V = \begin{cases} V_{R_{\max}} \frac{r}{R_{\max}} & r \leq R_{\max} \\ V_{R_{\max}} \left(\frac{R_{\max}}{r} \right)^h & r > R_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: V 为观测点风速; $V_{R_{\max}}$ 为台风最大风速半径处的风速大小; r 为观测点至台风中心的距离; R_{\max} 为台风最大风速半径; h 为台风气象相关系数,通常取0.5~0.7。其中, R_{\max} 、 $V_{R_{\max}}$ 的详细计算方法参考文献[32]。

文中仅考虑台风气候导致杆塔倒杆的情况,由于架空线路中的杆塔为串联形式,故任一杆塔的倒杆都将导致线路故障。文中基于文献[33]所构建的配电网杆塔故障概率曲线拟合模型计算台风行进过程中的杆塔故障率,根据杆塔串联模型进一步计算得到配电网线路故障率,如式(14)所示。

$$P_j = 1 - \prod_{m=1}^{N_{\text{pole}}} (1 - P_{m,t}) \quad (14)$$

式中: p_j 为线路 j 的故障率; $p_{m,t}$ 为第 m 根电杆的倒杆故障率; N_{pole} 为线路 j 的总电杆数。需要注意的是,台风行进过程中配电网线路的故障率是时变的。

此外,文中重点考虑配电网 $N-1$ 线路故障的情况,通过联络线进行负荷转供,确保全文负荷均存在有效供电路径。因此,当配电网发生 $N-k$ 线路故障时,可通过负荷削减优化模型进行网络重构^[34],再采用文中所提方法进行配电网节点电压状态监测与薄弱环节辨识。

3.2 配电网安全薄弱节点评价指标体系

文中考虑系统负荷状态变化与网络拓扑变化,根据DVVSR与VIT的相对位置关系,构建配电网安全薄弱节点评价指标体系。

3.2.1 节点电压静态越限指标

根据2.2节求解出所有虚拟支路对应的节点电压指标 $\sigma_i(s)$,通过持续增长嵌入因子 s 可得VIT。根据各节点VIT触及电压安全边界时的系统负荷状态(即嵌入因子 s 的大小),定义指标 $R_{i,1}$ 描述节点 i 的电压静态越限特性。

$$R_{i,1} = s_{i,1} \quad i \in S_{PQ} \cup S_{PV} \quad (15)$$

式中: $s_{i,1}$ 为节点 i (除平衡节点以外)VIT触及电压安全边界时嵌入因子 s 的大小。

指标 $R_{i,1}$ 主要表征节点 i 电压随系统负荷持续增长而出现的低电压风险,即节点电压安全裕度。指标 $R_{i,1}$ 越小则该节点越薄弱。

3.2.2 节点电压动态越限指标

根据2.3节所提PVIT快速求解方法,可得配电网 $N-1+1$ 运行方式下的PVIT,根据此时各节点PVIT触及电压安全边界时的系统负荷状态(即嵌入因子 s 的大小),定义指标 $R_{i,2}$ 描述节点 i 的电压动态越限特性。

$$R_{i,2} = s_{i,2} \quad i \in S_{PQ} \cup S_{PV} \quad (16)$$

式中: $s_{i,2}$ 为拓扑变化后节点 i (除平衡节点以外)PVIT触及电压安全边界时嵌入因子 s 的大小。

指标 $R_{i,2}$ 主要表征节点 i 的 $N-1$ 电压安全裕度。指标 $R_{i,2}$ 越小则该节点越薄弱。

3.2.3 节点薄弱性综合评价指标

综上所述,考虑配电网线路 $N-1$ 故障概率,提出配电网薄弱节点评价指标 S_i :

$$S_i = k_1 R_{i,1} + k_2 \sum_{j=1}^M \bar{P}_j R_{i,2} \quad (17)$$

式中: k_1 、 k_2 分别为指标 $R_{i,1}$ 和 $R_{i,2}$ 的权重系数,文中取 $k_1 = k_2 = 0.5$; \bar{P}_j 为归一化后线路 j 的故障概率,其计算如式(18)所示; M 为系统线路总数。若线路故障概率均为0,则取 $k_1 = 1$ 、 $k_2 = 0$ 。

$$\bar{P}_j = p_j / \sum_{j=1}^M p_j \quad (18)$$

指标 S_i 表征节点 i 的综合电压薄弱性, 即 S_i 越小, 节点 i 的电压薄弱性越强。

3.3 配电网 $N-1$ 故障下转供方案选取策略

配电网发生 $N-1$ 故障时可能存在多个转供方案, 使得系统中所有节点均存在有效供电路径。但不同转供方案所形成的运行方式, 其对应的节点电压安全裕度有所不同, 甚至在部分转供方案下, 大量节点存在电压越限的情况, 进一步扩大了故障影响范围。根据不同转供方案下求得的节点电压动态越限指标 $R_{i,2}$, 可选取最优的负荷转供方案。

根据 2.3 节所提考虑拓扑变化的 VIT 偏移求解方法, 求得不同转供方案下各节点的电压动态越限指标 $R_{i,2}$ 。各转供方案下节点电压动态越限指标 $R_{i,2}$ 的最小值可表征该运行方式下的系统电压安全裕度, 因此可将该指标值最大的转供方案视为最优负荷转供方案。

3.4 配电网薄弱环节辨识方法

基于所建的配电网薄弱节点辨识指标体系, 进一步提出配电网薄弱节点辨识方法, 具体如图 6 所示。(1) 阶段 1: 配电网正常运行时, 根据 2.2 节求解 VIT, 并计算节点电压静态越限指标 $R_{i,1}$ 。(2) 阶段 2: 配电网发生 $N-1$ 线路故障后, 根据负荷转供方案闭合联络线, 根据 2.2 节求解配电网 $N-1+1$ 运行方式下的 VIT。(3) 阶段 3: 根据 2.3 节所提方法求解拓扑变化后的 PVIT, 从而计算节点电压动态越限指标 $R_{i,2}$ 。(4) 阶段 4: 根据 3.3 节所提转供方案选取策略, 选取最优的负荷转供方案, 从而形成该故障下的 $N-1+1$ 运行方式, 接着判断线路故障是否遍历。(5) 根据式 (17) 计算配电网薄弱节点评价指标 S_i , 输出薄弱节点排序。

值得注意的是, 由于分布式电源与移动储能对配电网电压稳定具有改善作用^[35], 文中所提方法得到的配电网节点薄弱性排序可指导高渗透率分布式电源的合理配置以及移动储能的有序接入, 提升关键负荷点的电压安全裕度。

4 算例分析

文中将图 7 所示改进后的 IEEE 33 节点配电系统作为算例, 其中联络线①—⑤可用于负荷转供。考虑地理位置元素对 IEEE 33 节点配电系统进行修正, 以节点 1 为原点建立网格图, 网格大小为 $2.5 \text{ km} \times 2.5 \text{ km}$, 各线路长度可由网格换算得到。假定每条线路上的电杆数均为 12, 其中线路 1-2 和 2-3

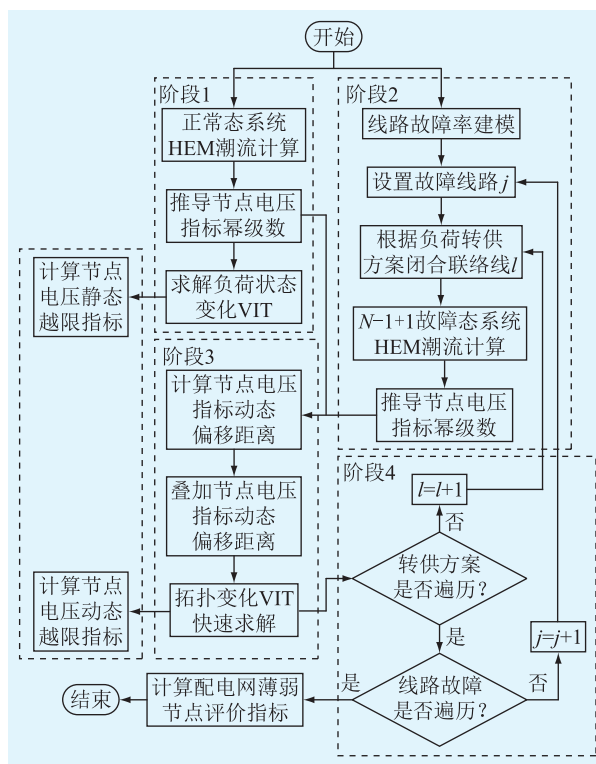


图 6 所提薄弱节点辨识方法的整体框架

Fig.6 The overall framework of the proposed weak node identification method

为电缆线路, 且联络线始终安全可靠。台风登陆位置的坐标为 $(144 \text{ km}, 75 \text{ km})$, 移动速度为 20 km/h , 移动方向如图 7 中红色虚线所示, 红色圆圈为台风行进过程中的最大风速半径圈。设置潮流计算的收敛精度为 $1 \times 10^{-6} \text{ p.u.}$, 待求变量幂级数阶数为 10 阶, 系统负荷按 $\Delta s = 0.001 \text{ p.u.}$ 持续增长。

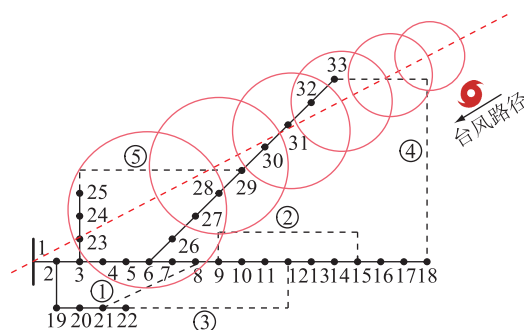


图 7 改进后的 IEEE 33 节点配电系统

Fig.7 Improved IEEE 33-node distribution system

由于配电线路相对于台风半径较短, 可认为同一条馈线上风速一致。根据配电线路故障率模型可计算得到台风行进过程中各支路的时变故障率, 仿真的起始时刻设置为台风登陆时刻。文中所采用的 Batts 风场模型的平均最大风速出现在最大风速半径处, 故随着台风行进, 线路上的风速先增大后减小。

4.1 VIT 偏移求解方法性能测试

根据文中所提轨迹偏移法求得的预期运行点与实际运行点在 σ 复平面上的距离定义偏移误差 E_i , 其计算如下:

$$\begin{cases} E_{i,R} = \text{Re}(D_{i,jl,s} - D_{i,jl,\text{real}}) \\ E_{i,I} = \text{Im}(D_{i,jl,s} - D_{i,jl,\text{real}}) \end{cases} \quad (19)$$

$$E_i = \max(|E_{i,R}|, |E_{i,I}|) \quad (20)$$

式中: $E_{i,R}$ 、 $E_{i,I}$ 分别为预测偏移距离在 σ 复平面内 2 个方向的误差; $D_{i,jl,\text{real}}$ 为在系统负荷缩放 s 倍、断开线路 j 、闭合联络线 l 时节点 i 的实际电压指标; $\text{Re}(\cdot)$ 、 $\text{Im}(\cdot)$ 分别为取实部和虚部。

预设故障场景为线路 28-29 发生断线, 依据负荷转供方案闭合联络线⑤, 采用所提方法快速求解拓扑变化后的 VIT, 具体见图 8。系统网络拓扑发生变化后, 各节点电压指标作出相应偏移。具体偏移方向和距离表征了各节点电压静态稳定性的变化, 由节点在网络中的位置与系统运行方式决定, 此时计算各个节点在网络拓扑变化前后的电压指标偏移距离, 该步骤对应图 5 中的阶段 1 和阶段 2。

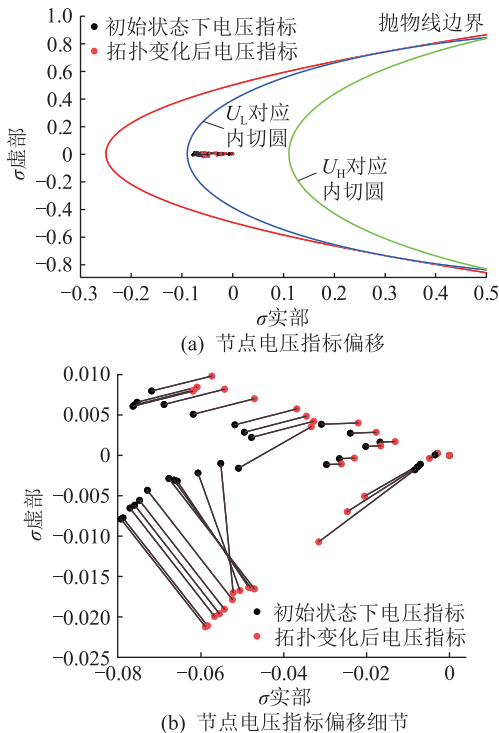


图 8 网络拓扑变化前后的节点电压指标偏移
Fig.8 Node voltage index deviation before and after network topology changes

为验证所提方法的准确性, 利用 HEM 求解网络拓扑变化后的节点电压指标解析表达式, 此时系统负荷数据采用算例标准参数。代入不同大小的 s (s 的取值范围为 $0.50 \sim 1.50$ p.u., $\Delta s = 0.01$ p.u.) 得到不同负荷状态下的节点电压指标, 将其作为节点

实际电压指标与所提方法求得的电压指标进行对比, 并根据式(20)计算偏移误差, 结果如图 9 所示。

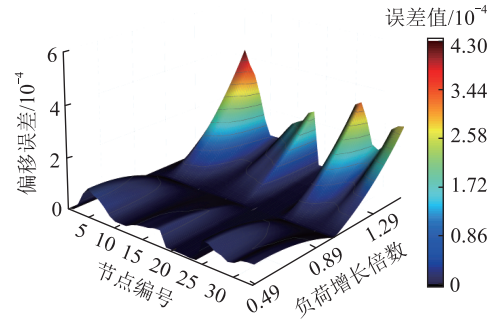


图 9 节点电压指标偏移误差

Fig.9 Node voltage index deviation error

由图 9 可知, 随着系统负荷的持续增加, 其电压稳定性逐渐降低, 带来的网络拓扑变化导致节点电压指标的偏移也增大, 此时文中所提方法的计算误差随之增大; 但所有节点电压指标的偏移误差值均小于 5×10^{-4} , 故可忽略误差对节点电压状态监测以及后续薄弱环节辨识结果的影响, 从而证明了文中所提 VIT 偏移求解方法的有效性。

4.2 IEEE 33 节点配电网 N-1 故障下转供方案选取

为验证所提负荷转供方案选取策略的有效性, 假定线路 7-8 发生故障断线, 根据负荷转供方案依次闭合联络线进行负荷转供。为确保所有负荷点均存在有效供电路径, 此处只考虑联络线①、③和④。转供方案 1 为线路 7-8 断开, 闭合联络线①; 转供方案 2 为线路 7-8 断开, 闭合联络线③; 转供方案 3 为线路 7-8 断开, 闭合联络线④。采用所提方法求解不同转供方案下各节点的节点电压动态越限指标 $R_{i,2}$, 根据指标 $R_{i,2}$ 进行薄弱性排序, 所对应的前十薄弱节点如表 1 所示。

表 1 各转供方案下前十薄弱节点

Table 1 Top 10 weak nodes under each transfer plan

排序	转供方案 1		转供方案 2		转供方案 3	
	节点	指标 $R_{i,2}$	节点	指标 $R_{i,2}$	节点	指标 $R_{i,2}$
1	18	1.390	33	1.463	8	0.620
2	17	1.401	32	1.468	9	0.625
3	16	1.438	31	1.487	10	0.633
4	33	1.463	18	1.538	11	0.634
5	15	1.465	17	1.551	12	0.638
6	32	1.468	30	1.575	13	0.657
7	31	1.487	16	1.597	14	0.667
8	14	1.493	15	1.630	15	0.681
9	13	1.541	29	1.660	16	0.699
10	30	1.575	14	1.665	17	0.747

由表 1 可知, 转供方案 3 中, 前十薄弱节点的指

标 $R_{i,2}$ 均小于 1.000, 表明该转供方案下初始负荷状态时的节点电压指标已超出 DVVSR, 需要进行切负荷操作避免故障影响范围进一步扩大, 故不选择该方案。同时, 对比转供方案 1 和方案 2 中最薄弱节点的指标 $R_{i,2}$ 的大小, 即 $R_{18,2}$ (方案 1) $<$ $R_{33,2}$ (方案 2), 可知方案 2 对应的系统电压安全裕度较大, 故选择方案 2 为最佳负荷转供方案。

4.3 配电网薄弱节点在线监测与辨识

文中对所提配电网薄弱节点辨识方法进行仿真分析。当 $t = 4$ h 时, 台风中心位置的坐标为 (73.05 km, 88.57 km), 此时处于配电网末端的线路风速较大, 因而故障率较高。

考虑 IEEE 33 节点配电系统的 $N-1$ 故障概率, 采用文中所提方法求解 VIT 以及网络拓扑变化后的节点电压指标。 $t = 4$ h 时, 节点 18 的电压安全状态监测示意如图 10 所示, 其中采用热图表示线路故障的概率, 观察系统正常运行时以及 $N-1+1$ 运行方式下的 PVIT, 预测未来运行环境中的电压越限事件, 实现配电系统节点电压安全状态的在线可视化监测。

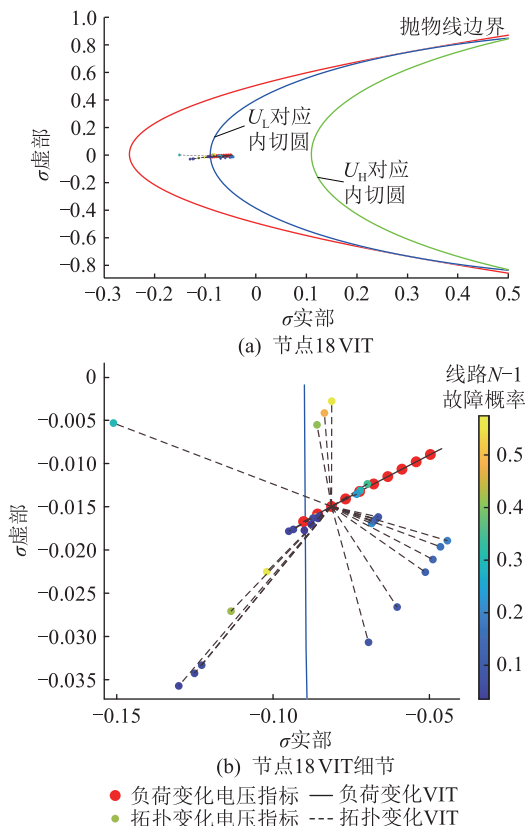


图 10 $t = 4$ h 时节点 18 的电压状态监测示意
Fig.10 Schematic diagram of voltage status monitoring at node 18 when $t = 4$ h

台风行进过程中, 节点薄弱性指标变化趋势如图 11 所示, 其中节点 18 为系统的最薄弱节点。由

系统拓扑及参数可知, 由于节点 18 为馈线末端节点, 线路功率的远距离传输导致其节点电压较低、初始电压安全裕度极小, 并且在配电网发生 $N-1$ 故障进行故障重构后, 节点 18 在大多数情况下仍处于线路后端, 其电压安全裕度进一步降低, 故辨识该节点为系统中的电压薄弱节点, 符合实际情况。

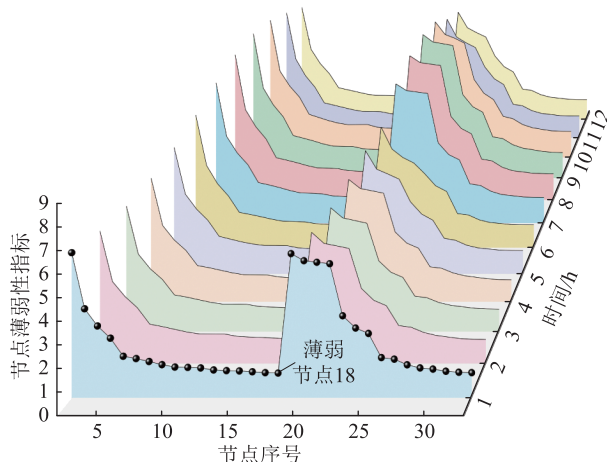


图 11 台风行进过程中节点薄弱性指标
Fig.11 Weakness index of nodes during typhoon movement

4.4 分布式电源根据节点薄弱性排序接入配电网

研究表明, 分布式电源渗透率在 20% ~ 30% 范围内时, 对网络损耗、电压稳定裕度、潮流分布会产生显著影响^[36]。因此, 文中分别在 IEEE 33 节点配电系统中接入 500 kW (渗透率约为 13.46%, 系统负荷数据采用算例标准参数) 和 1 000 kW (渗透率约为 26.92%) 的分布式电源, 选择 10 个节点 (除特殊节点 1 和节点 2 外) 按节点有功负荷比例分配不同大小的分布式电源进行仿真分析, 验证所提薄弱节点辨识方法可以指导分布式电源有序接入。

不同接入方案下的节点薄弱性指标变化趋势如图 12 所示 (除平衡节点外), 其中 R500 和 R1000 分别为随机选择节点接入 500 kW 分布式电源和 1 000 kW 分布式电源; S500 和 S1000 分别为根据 $t = 6$ h 的节点薄弱性排序接入 500 kW 分布式电源和 1 000 kW 分布式电源, 此时系统负荷数据采用算例标准参数。

由图 12 可知, 随机接入与有序接入一定容量的分布式电源均能提升薄弱节点的电压安全裕度。根据分布式电源接入点的不同, 各节点的薄弱性指标也不同。其中, 相较于随机接入, 根据节点薄弱性指标有序接入分布式电源能够更大程度提升薄弱节点电压安全裕度, 对系统整体的电压稳定性提升效果更好, 而随机接入分布式电源仅对接入节点的电压安全裕度有较明显的提升效果, 这进一步说

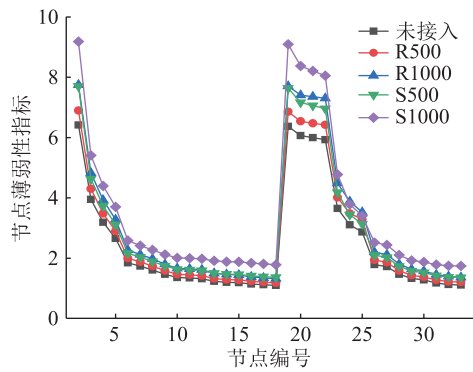


图 12 分布式电源接入配电网节点薄弱性对比

Fig.12 Comparison of weakness of distribution generation connected to distribution network nodes

明了文中所提薄弱节点辨识方法的有效性。同时,接入总容量为 1 000 kW 的分布式电源时对节点薄弱性指标的改善程度明显高于接入总容量为 500 kW 的分布式电源和不接入分布式电源的情况,说明在合理容量范围内,分布式电源的有序接入可以提升系统的电压安全裕度,更好地支撑电压薄弱节点安全稳定运行。

5 结论

文中将基于 HEM 的节点电压指标法应用于配电网薄弱节点辨识,详细推导并构建了配电网电压安全域。针对配电网“闭环设计、开环运行”的特点,提出考虑配电线路故障重构的节点电压状态可视化监测与薄弱节点辨识方法,并仿真说明了文中所提方法的有效性。主要结论如下:

(1) 文中考虑配电网故障重构后的网络拓扑变化,提出了 PVIT 快速求解方法,实现了配电网节点电压状态的在线可视化监测;

(2) 结合配电网电压安全域与 PVIT,提出了计及配电网 $N-1+1$ 运行方式的薄弱节点辨识方法,有效辨识出了配电网当前以及未来运行环境中的电压薄弱节点;

(3) 根据节点薄弱性排序接入分布式电源,可最大限度地提高配电网电压安全裕度。

参考文献:

- [1] 董旭柱,华祝虎,尚磊,等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术,2021,47(9):3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9):3021-3035.
- [2] 国家发展改革委,国家能源局. 电力发展“十三五”规划(2016-2020年)[R]. 北京:国家发展改革委,2016.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. 'Thirteenth Five-Year' plan for electricity deve-

lopment (2016-2020) [R]. Beijing: National Development and Reform Commission.

- [3] 闫大威,张天宇,李天翔,等. 考虑静态电压稳定性的城市电网储能优化配置研究[J]. 浙江电力,2024,43(7):76-85.
YAN Dawei, ZHANG Tianyu, LI Tianxiang, et al. Research on optimal allocation of energy storage in urban power grids considering static voltage stability [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(7):76-85.
- [4] 李京,刘道伟,赵高尚,等. 基于连续参数追踪的静态电压稳定域边界迁移构建新方法[J]. 电网技术,2020,44(2):465-477.
LI Jing, LIU Daowei, ZHAO Gaoshang, et al. A new method for transfer construction of static voltage stability region boundary based on continuous parameter tracking [J]. Power System Technology, 2020, 44(2):465-477.
- [5] 陈超洋,周勇,池明,等. 基于复杂网络理论的大电网脆弱性研究综述[J]. 控制与决策,2022,37(4):782-798.
CHEN Chaoyang, ZHOU Yong, CHI Ming, et al. Review of large power grid vulnerability based on complex network theory [J]. Control and Decision, 2022, 37(4):782-798.
- [6] 武汉大学,国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院,国家电网有限公司. 基于全纯嵌入法配电网节点电压安全状态监测方法及系统:CN202310755833.8[P]. 2023-10-10.
Wuhan University, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd. Research Institute, State Grid Corporation of China. Method and system for monitoring voltage security state of distribution network nodes based on holomorphic embedding method:CN2023-10755833.8[P]. 2023-10-10.
- [7] 陶淳逸. 基于时间 Petri 网的电-气综合能源系统薄弱环节辨识[J]. 电测与仪表,2024,61(5):1-8.
TAO Chunyi. Identification of weak links of electrical-gas integrated energy systems based on time Petri nets [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(5):1-8.
- [8] YANG S H, CHEN W R, ZHANG X X. Heterogeneous evolution of power system vulnerability in cascading failure graphs [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 69(1):179-183.
- [9] 李垚逸,吕飞鹏,刘利文,等. 基于 GNN 的复杂电网薄弱节点辨识[J/OL]. 武汉大学学报(工学版):1-12[2024-11-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1675.T.20240701.1645.002.html>.
LI Yaoyi, LYU Feipeng, LIU Liwen, et al. Identification of weak nodes in complex power grid based on GNN [J/OL]. Engineering Journal of Wuhan University: 1-12 [2024-11-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1675.T.20240701.1645.002.html>.
- [10] MA Z Y, SHEN C, LIU F, et al. Fast screening of vulnerable transmission lines in power grids; a PageRank-based approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2):1982-1991.
- [11] 徐一帆,董树锋,毛航银,等. 基于无迹变换法的配电网电压稳定指标概率分析及应用[J]. 中国电机工程学报,

- 2020,40(S1):47-55.
- XU Yifan, DONG Shufeng, MAO Hangyin, et al. Probability analysis and application of voltage stability index of distribution network based on unscented transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1):47-55.
- [12] 邹世豪, 曹永吉, 刘志文, 等. 计及多时间尺度电压失稳模式的电网薄弱环节辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(21):35-49.
- ZOU Shihao, CAO Yongji, LIU Zhiwen, et al. Identification of grid weak link considering voltage instability patterns at multiple time scales[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(21):35-49.
- [13] 仇晨光, 张振华, 李蓝青, 等. 计及 DSSC 的含新能源电网静态电压稳定性分析[J]. 电力建设, 2023, 44(10):33-40.
- QIU Chenguang, ZHANG Zhenhua, LI Lanqing, et al. Static voltage stability analysis of a power grid with new energy sources considering DSSC[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(10):33-40.
- [14] 王波, 王佳丽, 刘涤尘, 等. 基于高维随机矩阵理论的电网薄弱点评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6):1682-1691, 1864.
- WANG Bo, WANG Jiali, LIU Dichen, et al. Research on evaluating vulnerability of power network based on high-dimensional random matrix theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6):1682-1691, 1864.
- [15] 王波, 王红霞, 朱丹蕾, 等. 基于统一潮流大数据的综合能源系统薄弱点辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7):85-93.
- WANG Bo, WANG Hongxia, ZHU Danlei, et al. Identification method for weak nodes of integrated energy system based on big data of unified power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7):85-93.
- [16] 王劭菁, 任茂鑫, 曹培, 等. 基于随机矩阵理论的状态监测数据关联分析方法[J]. 高压电器, 2023, 59(11):155-161, 171.
- WANG Shaojing, REN Maoxin, CAO Pei, et al. Correlation analysis method of condition monitoring data based on random matrix theory[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11):155-161, 171.
- [17] SHI X, QIU R, LING Z N, et al. Spatio-temporal correlation analysis of online monitoring data for anomaly detection and location in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2):995-1006.
- [18] YAN J, HE H B, ZHONG X N, et al. Q-learning-based vulnerability analysis of smart grid against sequential topology attacks[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2017, 12(1):200-210.
- [19] 曾令康, 姚伟, 艾小猛, 等. 基于双 Q 学习的考虑暂态稳定约束的电网薄弱线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8):2429-2441.
- ZENG Lingang, YAO Wei, AI Xiaomeng, et al. Double Q-learning based identification of weak lines in power grid considering transient stability constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8):2429-2441.
- [20] 郑恒峰, 刘道伟, 李柏青, 等. 基于电压相量轨迹几何特征的电网节点时空关联特性评估[J]. 电网技术, 2020, 44(1):9-18.
- ZHENG Hengfeng, LIU Daowei, LI Baiqing, et al. Grid bus spatio-temporal linkage assessment based on geometric characteristics of voltage phasor trajectories[J]. Power System Technology, 2020, 44(1):9-18.
- [21] 郑恒峰, 李柏青, 刘道伟, 等. 基于电压相量时序轨迹特征的电网静态稳定态势在线评估指标[J]. 电网技术, 2021, 45(2):640-648.
- ZHENG Hengfeng, LI Baiqing, LIU Daowei, et al. On-line evaluation index of grid static stability situation based on timing trajectory characteristics of voltage phasors[J]. Power System Technology, 2021, 45(2):640-648.
- [22] TRIAS A. Sigma algebraic approximants as a diagnostic tool in power networks; US-9563722-B2[P]. 2017-02-07.
- [23] TRIAS A. The holomorphic embedding load flow method[C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA. IEEE, 2012:1-8.
- [24] TRIAS A. HELM; the holomorphic embedding load-flow method. Foundations and implementations[J]. Foundations and Trends® in Electric Energy Systems, 2018, 3(3/4):140-370.
- [25] 刘承锡, 赖秋频, 姚良忠, 等. 基于全纯嵌入法的电力系统解耦模型: 薄弱节点辨识[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5):1736-1748.
- LIU Chengxi, LAI Qiupin, YAO Liangzhong, et al. Power system decoupling model based on holomorphic embedding method: weak bus identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5):1736-1748.
- [26] LAI Q P, LIU C X, SUN K. Vulnerability assessment for voltage stability based on solvability regions of decoupled power flow equations[J]. Applied Energy, 2021, 304:117738.
- [27] 卡森, 武尔勒斯. 电力系统电压稳定性[M]. 王奔, 译. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- CUTSEM T V, VOURNAS C. Voltage stability of electric power systems[M]. WANG Ben, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [28] 李乃双, 郝丽丽, 郝思鹏, 等. 含分布式电源的配电网电压越限薄弱环节识别方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4):36-43.
- LI Naishuang, HAO Lili, HAO Sipeng, et al. Identification method of voltage over-limit weak link in distribution network with distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4):36-43.
- [29] LAI Q P, LIU C X, SUN K. Formulation and visualization of bus voltage-var safety regions for a power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4):3153-3156.
- [30] LIU C X, WANG B, HU F K, et al. Online voltage stability assessment for load areas based on the holomorphic embedding method[C]//2018 IEEE Power & Energy Society General

- Meeting (PESGM). Portland, OR, USA. IEEE, 2018; 1.
- [31] CASSOLA F, BURLANDO M. Wind speed and wind energy forecast through Kalman filtering of numerical weather prediction model output[J]. Applied Energy, 2012, 99: 154-166.
- [32] 李琳, 穆云飞, 殷自力, 等. 基于台风场景模拟的配电网架空线路薄弱环节辨识方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 150-157.
- LI Lin, MU Yunfei, YIN Zili, et al. Identification method of weak links of overhead lines in distribution network based on typhoon scenario simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 150-157.
- [33] 陈彬, 于继来. 强台风环境下配电线路故障概率评估方法[J]. 中国电力, 2019, 52(5): 89-95.
- CHEN Bin, YU Jilai. Outage probability evaluation of the distribution corridors under strong typhoon environment[J]. Electric Power, 2019, 52(5): 89-95.
- [34] 史明明, 刘瑞煌, 张宸宇, 等. 考虑输电网与柔性互联配电网交互影响的可靠性评估方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(4): 77-87.
- SHI Mingming, LIU Ruihuang, ZHANG Chenyu, et al. Analytical evaluation method of reliability considering interaction between transmission network and flexible interconnected distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(4): 77-87.
- [35] 徐一帆. 配电网电压稳定指标概率分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- XU Yifan. Probability analysis on voltage stability index of distribution network[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [36] ATWA Y M, EL-SAADANY E F. Optimal allocation of ESS in distribution systems with a high penetration of wind energy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(4): 1815-1822.

作者简介:



杨隽雯

杨隽雯(2000),女,硕士在读,研究方向为新型配电系统规划与运行(E-mail: yangjunwen@whu.edu.cn);

尚磊(1986),男,博士,副教授,研究方向为电力电子化电力系统频率/电压分析与优化控制技术、能源互联网技术等;

叶欣智(2000),男,硕士,从事智能配电网可靠性等相关工作。

A voltage weak node identification method considering fault reconstruction in distribution networks

YANG Junwen^{1,2}, SHANG Lei^{1,2}, YE Xinzhi³, LIU Chengxi^{1,2}, DONG Xuzhu^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Hubei Engineering and Technology Research Center for AC/DC Intelligent Distribution Network, Wuhan 430072, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: The voltage crossing limit problem is gradually highlighted and the stable operation of the system is becoming increasingly complex in the context of building a new distribution system. In this paper, based on the holomorphic embedding method, the offset characteristics of node voltage indicator trajectories under topology changes are studied, and a weak node identification method considering fault reconfiguration in distribution networks is proposed. Firstly, the node voltage index and distribution network voltage visible safety region are derived and constructed based on the idea of decoupling power system. Then, the node voltage index trajectory is solved based on the holomorphic embedding method. The concept of voltage index offset distance characterizing the trajectory characteristics is defined, and the probabilistic voltage index trajectory solution method is proposed taking into account the topology changes after the fault in distribution network. Finally, the weak node evaluation index system and identification method are proposed according to the relative position relationship between the voltage visible security region of distribution network and the node voltage index trajectory by considering the normal state and $N-1+1$ fault state operation conditions of the distribution network. Using the IEEE 33-node distribution system as an example for arithmetic analysis, the results show that the proposed method can realize the visual monitoring of the node voltage status and accurately identify the weak nodes.

Keywords: holomorphic embedding method; weak node; fault reconstruction; node voltage index; voltage safety region; voltage stability boundary

(编辑 陆海霞)