

电网结构对电压暂降传播的影响及其量化分析方法

胡文曦,肖先勇

(四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065)

摘要:有效的电压暂降治理方法对减少用户经济损失起着重要的作用。现有电压暂降治理方法基于随机预估等方式获取电网各节点的电压暂降水平,从而针对暂降严重的节点进行治理,但这些方法仅能量化暂降水平的大小,难以分析造成暂降严重的根本原因,治理效果亟待提高。其本质原因在于忽视了电压暂降在电网中的传播规律和电网结构对电压暂降的影响机制。为此,对电压暂降受电网结构属性的影响进行分析并对其量化方法开展研究。首先,基于电网故障模型分析电压暂降幅值与电网结构的关系,并将监测周期内多次故障下电网所有节点电压平均幅值构成的序列定义为电压暂降模式,以挖掘电压暂降受电网结构属性的影响;然后,通过分析电压暂降的传播特性,从电网拓扑属性和物理属性出发提出电压暂降结构性指标,从电网节点规模程度、聚集程度、传播效率和支撑能力等不同的方面量化电网结构对电压暂降的影响;最后,提出电压暂降受电网结构影响程度的综合评估方法,为电网侧电压暂降治理提供决策支持。基于IEEE 30节点系统的仿真结果验证了所提方法能够反映电网结构对电压暂降的影响规律,以敏感用户接入电网的规划为例,验证了所提结构指标有助于从电网侧治理电压暂降问题,并能够对优质供电园区的电网规划与重构、电网运行方式反演、电压暂降传播途径抑制等措施提供决策支持。

关键词:电压暂降;传播规律;电网结构属性;结构指标;暂降治理

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202006009

0 引言

随着高端制造业对供电系统难以避免的电压暂降事件越来越敏感,电压暂降已给用户造成了巨大的损失,因而成为了工业界和学术界关注的重点^[1]。对电压暂降问题采取有效的治理措施具有重要的理论价值和现实意义^[2]。

目前针对电压暂降的治理可分为用户侧的补救性措施和公用电网侧的预防性措施。这些措施均基于监测数据或仿真数据对各电网节点的电压暂降水平进行评估,通过识别电网电压暂降水平偏高的节点以对其进行治理^[3],评估方法主要包括实测统计法^[4]、随机预估法^[5]和状态估计法^[6]等。然而,通过暂降评估获取全网各节点电压暂降频次等指标仅能量化电压暂降是否严重,却难以分析导致电压暂降水平偏高的根本原因,以至于无法为电压暂降治理措施提供有效的决策支持。用户侧治理措施在电压暂降发生后采用定制电力技术保证优质供电^[3],但通常只考虑关注节点暂降水平的治理效果,而忽略了各节点间的相互作用,无法实现整体的治理效果最优。电网侧治理措施在电网规划以及电网重构时通过优化运行方式来降低电压暂降频次^[7-8],然而在电网规划和重构过程中,求解优化模型的每次迭代均需针对该拓扑方案通过随机预估方法计算各节点的电压暂降频次,计算耗时大。此外,随机预估模型的概率从本质上决定了评估结果的准确度不高,其

实用性较差。上述治理措施存在缺陷的根本原因在于忽视了电压暂降在电网中的传播规律,且未对电压暂降受电网结构属性的影响进行分析。

针对电压暂降在电网中的传播规律,现有研究仅讨论了电压暂降单一事件特征受变压器绕组联结方式的影响^[9],而并未从电网结构属性方面进行讨论。在其他领域,已有研究从电网结构角度出发基于线路传输功率识别电网中的脆弱节点和线路,从网络本身挖掘影响电网安全稳定的关键因素^[10-11]。然而电压暂降在电网中的传播具有故障传播所不具有的特性,因此需要研究电压暂降受电网结构影响的分析方法。

为了挖掘电网结构属性对电压暂降传播的影响规律,进而为考虑电能质量的电网规划与重构、敏感负荷接入点选择、定制电力设备优化配置等难题提供决策支持,本文对电压暂降受电网结构的影响规律进行分析并提出相关的量化方法。首先,基于电网故障模型分析监测周期内多次故障下电网所有节点电压平均幅值构成的电压暂降模式SP(Sag Pattern)受电网结构属性的影响;然后,通过分析电压暂降的传播特性,从电网拓扑属性和物理属性出发提出电网节点规模程度、聚集程度、传播效率和支撑能力等电压暂降结构性指标;最后,提出电压暂降受电网结构影响程度的综合评估方法,为电网侧电压暂降治理提供决策支持。通过对IEEE 30节点系统进行仿真验证,结果表明本文所提节点指标能够反映电压暂降受电网结构的影响程度,且研究成果有助

于提升电网侧电压暂降治理效果。

1 电压暂降受电网结构的影响分析

电网故障是造成电压暂降的主要原因,当故障位置、故障类型或故障电阻发生改变时,各节点的电压幅值也会发生变化。此外,当电网结构发生改变时,监测节点与故障点之间的电气距离发生变化,各节点的电压幅值同样也会改变。因此,电压暂降可以看作是故障和电网结构共同作用的结果,也可以将电网结构看作电网故障与电压暂降之间的映射关系^[12-13]。

虽然已有研究分析了电压暂降单一事件的特征经过变压器传播后的变化^[13],但并未从电网结构的角度分析不同结构下电网电压暂降水平的变化特性。因此,现有研究的分析结果并不能反映电网结构对电压暂降水平的影响,也难以根据电压暂降传播机理对电压暂降进行治理,尤其是对电网规划层面的提前预防起到理论支撑的作用。此外,考虑电压暂降发生的随机性,单次故障下电网各节点的电压暂降水平难以反映其受电网结构影响的规律,应从一定的监测周期内对电网节点的电压暂降水平进行统计分析。因此,为了挖掘不同电网结构下系统发生故障后所有节点电压暂降幅值的变化规律,本文将监测周期内电网中 n 个节点的电压平均幅值构成的序列定义为电压暂降模式,如式(1)所示。

$$\alpha_{sp} = \{U_{ESM1}, U_{ESM2}, \dots, U_{ESMi}, \dots, U_{ESMn}\} \quad (1)$$

其中, U_{ESMi} 为节点 i 的电压幅值平均值,可由式(2)计算得到。

$$U_{ESMi} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m U_{i,k} \quad (2)$$

其中, $U_{i,k}$ 为电网发生第 k 次故障时节点 i 的电压幅值; m 为监测周期内电网发生的故障总次数。电压暂降模式既能从时间上反映各节点在监测周期内的总体暂降水平,又能从空间上反映各节点电压暂降幅值的对比关系。可以证明,当电网的故障分布保持不变时,若电网结构属性不发生改变,则电网暂降模式也不会发生显著变化,其具体验证过程见第4节。在此基础上,如何量化不同电网结构的影响程度,并从电网规划、重构等角度通过减小电压暂降的影响范围进而提前预防暂降,是亟待解决的问题。

2 面向电压暂降的电网结构属性指标体系

2.1 电压暂降的传播特性

故障类型和故障电阻相同的同一故障经不同的网络拓扑传播之后,其影响范围可能不同,最终形成的电压暂降模式也会不同。为了量化电网结构属性对暂降模式的影响,首先需要分析电压暂降在电网中的传播规律。从电网故障模型可以看出,随着电

气距离的增大,电压暂降深度逐渐变小,电压幅值逐渐升高。电压幅值从故障点处开始随着电气距离的增大而逐渐升高的路径可看作电压暂降传播路径。不同于信息在复杂网络中的传播,电压暂降传播具有以下特性。

(1)在病毒、信息等其他复杂网络中,传播对象总是依据某原则进行布尔开关式选择下一传播节点。电压暂降的传播并不具有这样的性质,其传播路径并不唯一,而是以故障点为中心呈辐射状传播。因此,该特性使得处于网络中心或者相邻节点更多的节点更容易受到从其他节点传播的电压暂降的影响。

(2)电压暂降从故障点处向外传播时,随着电气距离的增大,其幅值会逐渐升高,可看作传播逐渐衰减,当幅值超过设定的电压暂降阈值时,传播结束。因此,该特性使得距离其他节点电气距离较近的电网节点容易受到从其他节点传播的电压暂降的影响。

综上,电网结构的变化会造成节点连接关系的改变,进而直接影响节点之间的电气距离和可传播路径,最终造成电网的电压暂降模式发生改变。

2.2 电网结构性指标体系

由于节点之间的电气距离和可传播路径是影响节点电压暂降水平的重要因素,可根据电压暂降传播特性提出面向电压暂降的电网结构性指标体系。

(1)规模程度。

采用规模程度反映物体在网络中传播的共性:节点所连接的线路(边)越多,则越容易接收从其他节点传播来的电压暂降事件。电网节点的邻接程度反映了一个节点对其他节点的直接影响力,即节点之间是否构成电压暂降传播的通路。因此,可计算任意节点的相邻节点规模程度 f_i ,如式(3)所示。

$$f_i = k_i + \sum_{j \in G} k_j \quad (3)$$

其中, k_i 为节点 i 的邻边数量; G 为节点 j 的相邻节点所构成的集合。考虑到当节点本身的邻边少但相邻节点的邻边多时,该节点仍会容易受到其他节点传来的电压暂降,式(3)不仅考虑了节点本身的邻边数量,还考虑了相邻节点的信息。此外,由于 f_i 仅反映了电网局部节点的规模程度,属于局部指标,可进一步根据式(4)计算全局指标 F_i 。

$$F_i = f_i / \sum_{j=1}^n f_j \quad (4)$$

(2)聚集程度。

规模程度仅反映了节点与相邻节点的规模,但并未反映节点之间的紧密程度。针对电压暂降传播路径不唯一的特性,采用节点聚集程度指标 c_i 对其进行量化,如式(5)所示。

$$c_i = \frac{2e_i}{t_i(t_i-1)} \frac{1}{f_i} \quad (5)$$

其中, e_i 为节点 i 参与构成网孔的个数, t_i 为最小网孔所包含的节点数, 理论上这些节点最多可以组成 $t_i(t_i-1)/2$ 条相连的边, 因此二者之比 $e_i/[t_i(t_i-1)/2]$ 可反映节点连接的紧密程度。此外, 通过 f_i 反映相邻节点的规模程度, 进而表征节点的聚集程度。同样, c_i 仅反映了电网局部的聚集程度, 需根据式(6)计算全局指标 C_i 。

$$C_i = c_i / \sum_{j=1}^n c_j \quad (6)$$

(3) 传播效率。

电网节点的规模程度和聚集程度均反映了电网节点的拓扑属性, 但难以表征物理属性, 即电压暂降传播受电气距离和电源等因素的影响。针对电压暂降传播的衰减特性, 提出电网节点的传播效率指标 E_i , 将其定义为节点 i 与其他节点之间电气距离倒数之和的平均值, 如式(7)所示。

$$E_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{l_{ij}} \quad (7)$$

其中, l_{ij} 为节点 i 与相邻节点 j 之间的最短电气距离。节点传播效率可以表征电压暂降从该节点传播到网络中其他节点的平均难易程度: 传播效率值越高, 表明该节点距离其他节点的距离越近。从空间自相关的角度来看, 2个对象之间的距离越远, 则对彼此的依赖程度越弱, 即该节点受到其他节点传播的电压暂降影响的可能性越小。

(4) 支撑能力。

针对电压暂降传播受电源支撑影响的特性, 以节点距电源的最短距离作为电网节点支撑能力指标 S_i , 如式(8)所示。

$$S_i = \min \{l_{ij} \mid j \in K\} \quad (8)$$

其中, K 为电源节点构成的集合。

综上, 本文从拓扑属性和物理属性分别针对网络传播的共性与电压暂降传播的特性提出电网结构属性指标。这些指标从不同的方面反映了电网结构属性对电压暂降传播的影响, 电网节点的结构指标越大, 表明该节点与电网其他节点的联系越强, 在相同的故障分布情况下, 该节点受到其他节点传播的电压暂降事件越多, 因此该节点的电压暂降水平越高。

3 电压暂降受电网结构影响程度量化方法及其应用

3.1 电网结构属性影响程度评估

不同于复杂网络理论中所研究的信息网或关系网模型, 电网线路应该看作权重由电气距离所决定

的加权边。为了反映电压暂降传播的物理属性, 将各线路归一化后的阻抗值看作该线路的等效电气距离。其中, 将变压器看作特殊的传播线路, 其等效距离与自身阻抗值和电压暂降在不同电压等级中的传播方向有关。根据电网元件参数和拓扑结构, 对线路阻抗值进行归一化处理得到各条线路的权重, 然后可计算电网结构性指标, 具体步骤如下。

(1) 根据网络拓扑对所有节点和线路进行编号, 得到网络中所有节点集合 N 和所有电源节点集合 K 。

(2) 将所有电网线路简化为有权边, 根据线路阻抗值对电网所有线路进行归一化处理, 从而得到各边的权重。权重反映了线路参数的大小, 即电气距离的远近, 因此可将其看作线路的等效长度。

(3) 基于各节点与其他节点的连接关系建立邻接矩阵, 若两节点直接相连则相应的邻接矩阵元素置1, 否则置0。对于 n 节点系统而言, 可得到 $n \times n$ 阶的0-1邻接矩阵 A 。

(4) 将邻接矩阵 A 中为1的元素替换为对应边的权重, 为0的元素替换为 ∞ , 并基于 Floyd 算法寻找任意两节点之间的最短路径^[15]。

(5) 根据式(3)—(8)计算电网所有节点的规模程度、聚集程度、传播效率和支撑能力指标。

(6) 对指标向量进行同趋势化和 Z-score 标准化处理, 得到结构性指标向量。

考虑到分项电压暂降指标难以综合比较节点电压暂降水平受电网结构的影响程度, 可将指标向量合成为综合指标。熵权法是一种客观的赋权方法, 利用熵权法给指标赋权, 可以避免各评估指标权重受人为主观因素干扰, 使评估结果更符合实际^[16]。其原理是基于各指标的熵值衡量指标信息量的大小, 包含的信息量越多, 则应赋予更高的权重值, 从而确保所建立的指标能够反映绝大部分的原始信息。可根据式(9)计算信息熵 E_{ij} , 根据式(10)确定各指标的权重系数 w_j 。

$$E_{ij} = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (9)$$

$$w_j = \frac{1 - E_{nj}}{n - \sum_{j=1}^{m_1} E_{nj}} \quad (10)$$

其中, p_{ij} 为节点 i 的第 j 项指标占有所有节点指标之和的比重; m_1 为指标数量。

通过对分项指标赋权可得到各节点的综合指标 I_i , 即电网结构对电压暂降的影响程度指标, 如式(11)所示。

$$I_i = F_i w_1 + C_i w_2 + E_i w_3 + S_i w_4 \quad (11)$$

3.2 基于影响程度量化的电压暂降治理方法

虽然通过随机预估模型设置故障点也能评估电压暂降水平^[5],但该方法只能辨识电压暂降水平高的节点,并不能分析导致节点电压暂降水平更高的原因。因此只能针对电压暂降水平高的节点,通过补偿设备进行补救性治理,但治理成本高且效果不佳。现有电网侧电压暂降治理措施在选择电网规划、重构或运行方式时,通过优化网络结构来降低电压暂降频次,然而这些方法均需要基于随机预估法评估每种电网结构下的电压暂降水平,计算量太大。基于本文所提电网结构指标和影响程度评估方法,以优质供电园区为应用场景,可通过优化电网结构来降低电网的电压暂降水平。

优质供电园区电网规划以降低线损 $f_1(x)$ 为目标函数,如式(12)所示。

$$\min f_1(x) = \sum_{i=1}^{N_b} P_i = \sum_{i=1}^{N_b} R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \quad (12)$$

其中, P_i 和 Q_i 分别为流过线路 i 的有功功率和无功功率; R_i 为线路 i 的电阻; U_i 为线路 i 的末端电压; N_b 为线路数量。此外,引入节点综合结构指标 $f_2(x)$ 作为目标函数,如式(13)所示。

$$\min f_2(x) = \sum_{i \in N_p} I_i \quad (13)$$

其中, N_p 为接入敏感负荷的节点集合。

以功率平衡、线路容量和节点电压为约束条件,如式(14)~(17)所示。

$$P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (14)$$

$$Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (15)$$

$$L_i \leq L_{i \max} \quad (16)$$

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \quad (17)$$

其中, G_{ij} 、 B_{ij} 和 θ_{ij} 分别为节点 i 、 j 间线路的电导、电纳和电压相角差; L_i 为线路 i 的容量; $L_{i \max}$ 为线路 i 允许的最大容量; $U_{i \min}$ 和 $U_{i \max}$ 分别为节点 i 电压的下限和上限; $j \in i$ 表示节点 j 与节点 i 相连。为了保证满足电网结构的可靠性和经济性要求,本文基于分层优化的思想,将线损目标函数作为第1层优化目标,将电网结构指标作为第2层优化目标,采用宽容完全分层法^[17],从高到低逐层求解从而得到优化结果。可针对电能质量有更高需求的优质供电园区,或是电网中接入了敏感负荷的节点,从电网层面进行电压暂降治理。值得注意的是,本文仅针对电压暂降受电网结构的影响程度进行研究,电网规划、重构只是本文所提方法的应用场景之一,其目标函数、约束条件以及优化方案的求解方法均不在本文的研究范围之内。

4 算例分析

4.1 电网结构属性与电压暂降模式的关联分析

本文对附录中图A1所示的IEEE 30节点系统进行仿真验证,网络参数见文献[18]。

首先,为了验证电网结构与电压暂降水平之间存在关联关系,本文基于蒙特卡洛法采用电网故障随机模型计算监测周期内电网多次故障下各节点的电压幅值平均值,即电网电压暂降模式。电网故障随机模型考虑单相接地故障、两相接地故障、两相相间短路故障和三相短路故障,并设其发生概率之比为0.65:0.2:0.1:0.05,假设故障随机分布在系统中的任意1条线路上,与首端节点的距离服从 $[0,1]$ p.u.范围内的均匀分布,故障电阻服从 $[1,5] \Omega$ 范围内的正态分布,持续时间服从 $[0.01,0.06]$ s范围内的正态分布。考虑到随机模型的概率本质,为了减少电压暂降随机性对暂降模式的影响,重复10次仿真,每次基于故障随机模型生成1000次故障,根据电网电压暂降平均幅值的大小进行排序,所得电压暂降模式的分布规律如图1所示。

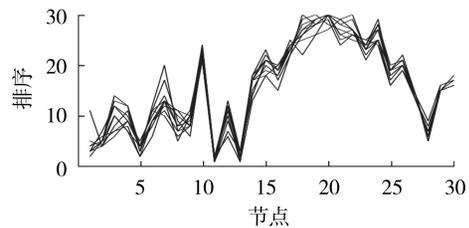


图1 电压暂降模式的分布规律

Fig.1 Distribution rule of voltage sag pattern

从图1中可以看出,虽然由于随机预估模型的概率本质导致10条曲线并不完全重合,但仍然呈现出明显的分布规律。这进一步能够说明电压暂降受电网结构的影响呈现出一定的规律。遗憾的是,随机预估模型仅能得到电压暂降的分布结果,却无法定量分析造成这种结果的原因和规律。为了验证本文所提电网结构指标能够反映电网结构属性对电压暂降的影响,需对结构指标与电压暂降模式进行关联分析。根据第3节所述计算方法,计算电网节点的各结构指标,结果如附录中表A1所示。

图1中节点18、19是全网电压暂降水平最高的2个节点,根据附录中表A1所示对应节点的指标结果可以看出,其原因在于节点传播效率和支撑能力指标值过高,即这2个节点距离电网中其他节点的距离近且距离电源远。然而,节点10的电压暂降水平同样偏高,这是因为节点10的规模程度和聚集程度指标值偏高。因此,基于本文所提方法可以从电网结构层面分析电网节点电压暂降水平偏高的根本原因,进而为电压暂降治理提供依据。

为了进一步分析结构指标的合理性,基于分项指标采用模糊C均值聚类分析^[19],得到电网节点的聚类结果,并将聚类结果按照图1所示排序结果进行排序,结果如图2所示。由于同一类节点在电网结构上具有相似性,而根据结构指标划分为同一类的节点在电压暂降水平上同样也相近,且不同类型节点在排序上并不存在交叉的情况,这进一步验证了本文所提结构指标能反映电网结构对电压暂降水平的影响规律。

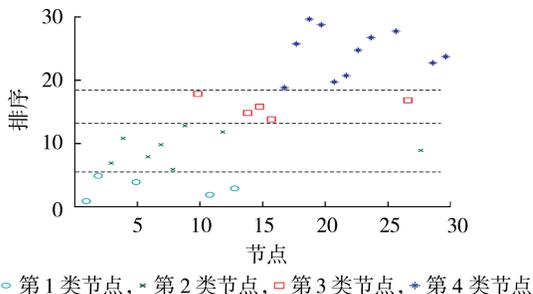


图2 基于电网结构指标的聚类结果

Fig.2 Cluster results based on grid structure indices

将图2中的各类节点在IEEE 30节点系统中进行划分,结果如附录中图A2所示。由图A2可以得出一般规律:离发电机节点越远、相邻节点越多、距其他节点的电气距离越小的电网节点,越容易受其他节点传播的电压暂降影响,进而造成该节点的电压暂降水平更高。综上,本文所提电网结构指标从拓扑属性和物理属性出发,多方面地反映了电网结构对电压暂降的影响,且量化结果与电网节点电压暂降水平之间存在关联关系。

4.2 基于电网结构优化的暂降治理方法

假设节点18—20有敏感负荷接入,为了避免这些节点电压暂降水平过高,基于式(12)—(17)建立多目标优化模型,采用粒子群优化算法对其进行求解^[20],设置粒子个数为10,算法允许迭代的最大次数为80。IEEE 30节点系统拓扑以及考虑电网结构指标后的优化拓扑如图3所示。

从原拓扑可以看出,因相邻节点聚集以及距电网电源、与其他节点间的电气距离远,部分节点的电压暂降水平较高。值得注意的是,虽然与节点18—20直接相邻的节点并不多,但由于本文所提聚集程度指标考虑了间接相连的节点,其聚集程度指标值很高,这样更符合电压暂降的传播规律。对2种拓扑分别进行10次蒙特卡洛仿真,每次随机模拟1000次故障,得到全网的电压暂降模式如图4所示。图中电压暂降平均幅值为标么值。

从图4中可看出,接入敏感负荷的节点18—20在基于电网结构指标的优化拓扑下的电压暂降幅值明显高于原电网拓扑下的电压暂降幅值。此外,节

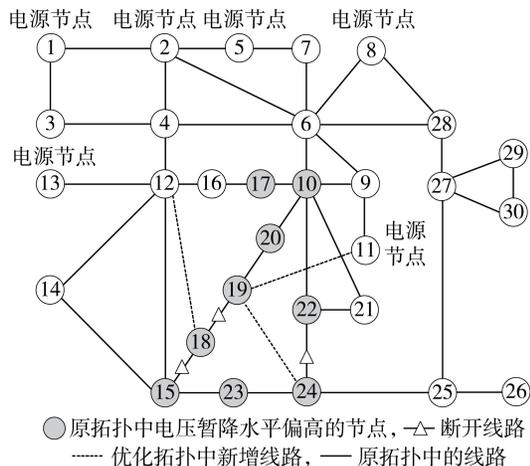


图3 IEEE 30节点系统拓扑以及考虑电网结构指标后的优化拓扑

Fig.3 Topology of IEEE 30-bus system and its optimal topology considering grid structure indices

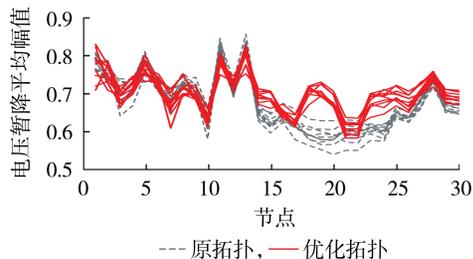


图4 不同电网结构下的电压暂降模式

Fig.4 Voltage sag patterns under different grid structures

点15、23和24的电压暂降幅值也得到提升,说明本文所提方法对关注节点在内的区域电网有着整体的电压暂降治理作用。因此,在满足电网常规约束的前提下通过优化拓扑可以实现提前预防电压暂降的目的。

虽然本文所提方法与随机预估方法同样都能用于电网规划,但本文所提结构指标有着明确的定义,能够指导决策者在满足电网规划基本约束的条件下基于专家经验或者优化模型通过改变网络拓扑实现电压暂降预防。而随机预估方法难以在优化模型的每次求解中提高计算效率,也无法消除概率本质引入的误差,因而通常只能找到电压暂降严重的节点进行补救,其治理成本较高,治理效果有待提升。此外,本文所提电网结构指标还可应用于电网运行方式的反演。对于电能质量监测系统而言,其难以获得系统的实时运行方式,基于已知的电网结构参数和监测点记录的电压暂降信息,可通过电网结构指标对运行方式进行反演,并在此基础上预估电压暂降的影响范围和电网未监测点的电压暂降水平。

5 结论

本文针对电压暂降受电网结构的影响进行分析

并提出其量化方法,以期对电网侧电压暂降治理提供决策支持。基于电网故障模型分析电网参数与电压暂降幅值之间的关系,从电压暂降的传播特性出发,提出节点规模程度、聚集程度、传播效率和支撑程度等电网结构指标。这些指标从不同的方面反映了电网结构对电压暂降的影响。在此基础上通过加权引入综合指标量化电网拓扑对电压暂降传播的影响程度,并以敏感负荷接入的电网规划为例验证本文所提方法在电压暂降治理中的作用。基于IEEE 30节点系统的仿真结果表明电网电压暂降模式是电网结构和故障分布共同作用的结果,而本文建立的结构指标能够从中挖掘电压暂降受电网结构影响的规律。通过引入本文所提影响程度指标作为优化函数,优质供电园区或者电压暂降敏感用户接入电网的规划或重构可通过优化电网结构起到整体改善电压暂降的作用。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京:中国电力出版社, 2010:124-138.
- [2] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(三)——电力系统的电压凹陷[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(12):1-4.
YANG Honggeng, XIAO Xianyong, LIU Junyong. Issues and technology assessment on power quality part 3: voltage sags in power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(12):1-4.
- [3] 刘阳,肖先勇,刘旭娜,等. 考虑用户定量需求的优质电力园区DVR优化配置[J]. 电网技术, 2015, 39(3):823-828.
LIU Yang, XIAO Xianyong, LIU Xuna, et al. Optimal configuration of DVR in premium power park considering customers' quantitative demand[J]. Power System Technology, 2015, 39(3):823-828.
- [4] 司学振,李琼林,杨家莉,等. 基于实测数据的电压暂降特性分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12):144-149.
SI Xuezhen, LI Qionglin, YANG Jiali, et al. Analysis of voltage sag characteristics based on measured data[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12):144-149.
- [5] PARK C H, JANG G. Stochastic estimation of voltage sags in a large meshed network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3):1655-1664.
- [6] LUCIO J, ESPINOSA-JUÁREZ E, HERNÁNDEZ A. Voltage sag state estimation in power systems by applying genetic algorithms[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(2):223-230.
- [7] JAZEBI S, VAHIDI B. Reconfiguration of distribution networks to mitigate utilities power quality disturbances[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 91:9-17.
- [8] BAHADOORSINGH S, MILANOVIC J V, ZHANG Y, et al. Minimization of voltage sag costs by optimal reconfiguration of distribution network using genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4):2271-2278.
- [9] 陶顺,肖湘宁. 中性点不同接地方式下的电压暂降类型及其在变压器间的传递(二)[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10):156-159.
TAO Shun, XIAO Xiangning. Voltage sags types under different grounding modes of neutral and their propagation: part II [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10):156-159.
- [10] 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 system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1):33-39.
- [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] 陈丽,杨洪耕,吴晓清. 基于模式识别的配电网故障区段定位[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(1):88-91.
CHEN Li, YANG Honggeng, WU Xiaoqing. Fault location for distribution networks based on pattern recognition technique [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2012, 31(1):88-91.
- [13] ROMERO M, GALLEGO L, PAVAS A. Fault zones location on distribution systems based on clustering of voltage sags patterns[C]//2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Hong Kong, China:IEEE, 2012:486-493.
- [14] 赵岩,胡学浩. 分布式发电对配电网电压暂降的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(14):5-9, 18.
ZHAO Yan, HU Xuehao. Impacts of distributed generation on distribution system voltage sags[J]. Power System Technology, 2008, 32(14):5-9, 18.
- [15] 朱浩,张玉. 基于改进的Floyd算法求节点间所有最短路径[J]. 电声技术, 2011, 35(12):65-67.
ZHU Hao, ZHANG Yu. Finding shortest paths between nodes based on improved Floyd algorithm[J]. Audio Engineering, 2011, 35(12):65-67.
- [16] 马纪,刘希喆. 基于 G_2 -熵权法的低压配网台区状态特性评估[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1):41-46.
MA Ji, LIU Xizhe. Conditional characteristic evaluation based on G_2 -entropy weight method for low-voltage distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1):41-46.
- [17] 程浩忠,高赐威,马则良,等. 多目标电网规划的分层最优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10):11-16.
CHENG Haozhong, GAO Ciwei, MA Zeliang, et al. The lexicographically stratified method for multi-object optimal electric power network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10):11-16.
- [18] University of Washington Electrical Engineering. 300 bus power flow test case [EB/OL]. [2019-07-30]. http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm.
- [19] BISWAL B, DASH P K, PANIGRAHI B K. Power quality disturbance classification using fuzzy C-means algorithm and

adaptive particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(1): 212-220.

- [20] 张衡,程浩忠,曾平良,等. 分位数拟合的点估计法随机潮流在输电网规划中的应用[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 43-49.

ZHANG Heng, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. Application of stochastic power flow based on quantile fitting point estimation method in transmission network expansion planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 43-49.

作者简介:



胡文曦

胡文曦(1993—),男,四川内江人,博士研究生,主要研究方向为电力扰动数据分析(**E-mail**: 408803186@qq.com);

肖先勇(1968—),男,四川宜宾人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电能质量与优质供电(**E-mail**: xiaoxianyong@163.com)。

(编辑 陆丹)

Influence of grid structure on voltage sag propagation and its quantitative analysis method

HU Wenxi, XIAO Xianyong

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The effective voltage sag management methods play an important role in reducing the economic loss of users. Existing voltage sag management methods obtain the voltage sag level of each node in the grid based on random estimation and other methods, so as to control the nodes with serious sag. However, these methods can only quantify the magnitude of voltage sag level but not analyze the fundamental cause of the serious sag, and the management effect needs to be improved urgently. The essential reason is that the propagation rule of voltage sag in power grid and the influence mechanism of power grid structure on voltage sag are neglected. For this reason, the influence of grid structure attribute on voltage sag is analyzed and its quantitative method is studied. Firstly, based on the grid fault model, the relationship between the voltage sag magnitude and the grid structure is analyzed, and the sequence of the average voltage amplitude of all nodes in the grid under multiple faults during the monitoring period is defined as the voltage sag pattern, so as to explore the influence of grid structure attributes on voltage sag. Then, by analyzing the propagation characteristics of voltage sag, the structural indicators of voltage sag are proposed based on the topological and physical properties of power grid, and the influence of power grid structure on voltage sag is quantified from different aspects, such as node size degree, aggregation degree, propagation efficiency and supporting capacity. Finally, a comprehensive evaluation method of influence degree is proposed to provide decision support for grid side voltage sag management. Simulative results based on IEEE 30-bus system verify that the proposed method can reflect the influence of grid structure on voltage sag. Taking the planning of power grid with sensitive users as an example, it is verified that the proposed structural indicators are helpful to control the voltage sag problem from the power grid side, and can provide decision-making support for power grid planning and reconstruction, inversion of power grid operation mode and suppression of voltage sag propagation path in the high quality power supply park.

Key words: voltage sag; propagation rule; structure attribute of power grid; structural indicators; sag management

附录

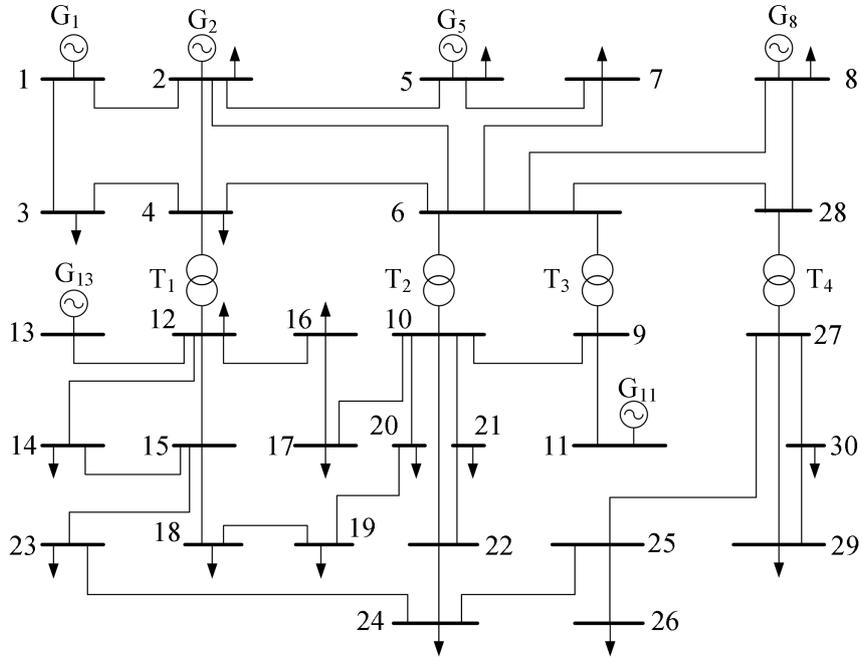


图 A1 IEEE 30 节点测试系统的拓扑结构
Fig.A1 Topology structure of IEEE 30-bus test system

表 A1 电网节点结构性指标
Table A1 Structure indices of grid node

节点	F	C	E	S
1	0.6742	0.7951	1.1577	0
2	1.6011	0.8374	0.6311	0
3	0.6742	0.7951	1.1603	0.4192
4	1.8539	0.9215	0.4718	0.4192
...
9	1.4326	1.7905	0.7139	0.4188
10	2.1067	1.9542	0.5909	0.8247
11	0.3371	0	2.1214	0
...
17	0.8427	0.4464	1.7619	2.2435
18	0.6742	0.6687	1.8740	2.2564
19	0.5056	0.7687	1.8619	2.6623
20	0.8427	0.4157	1.9002	2.2435
21	0.9270	0.3910	1.6025	2.2435
...
28	1.2640	0.2475	1.1600	0.4192
29	0.5899	1.0580	1.1619	1.9187
30	0.5899	1.0580	1.2842	1.9187

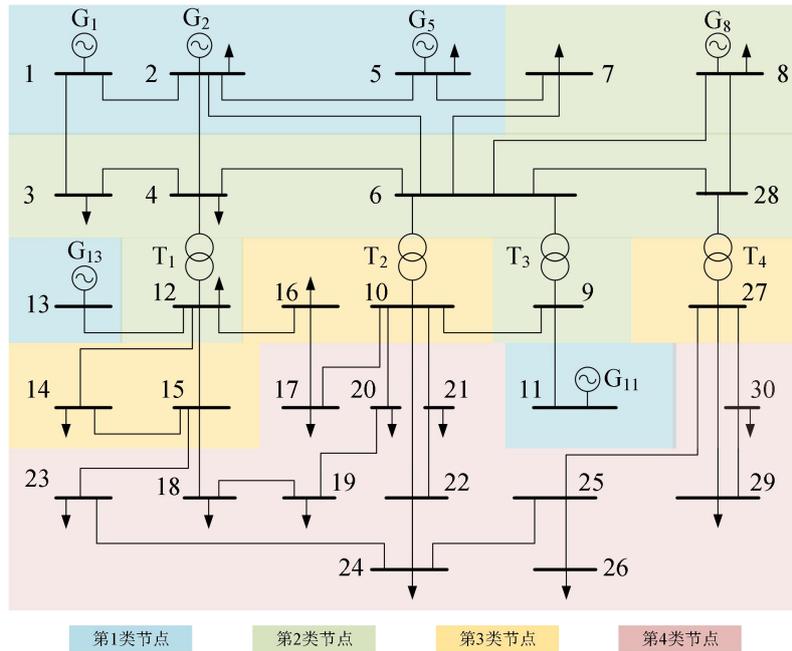


图 A2 IEEE 30 节点系统的节点分类结果
 Fig.A2 Classification result of nodes in IEEE 30-bus system