

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190675

基于网络传播特性的配电网电压暂降随机预估方法

谢伟伦, 薛峰, 黄志威

(广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东 东莞 523008)

摘要: 敏感负荷的大量投运使得用户对电能质量的要求不断提高, 电压暂降的快速有效预估成为当前电压暂降研究的一项重要内容。提出了一种基于网络传播特性的配电网电压暂降随机预估方法。首先基于配电网拓扑搜索电压暂降传播路径, 通过序分量法获得不同路径下电压暂降的垂直/水平传播特性。进而根据路径搜索结果建立故障源至负荷侧的配电网电压暂降传播方程。最后结合不同故障类型及线路故障率计算暂降凹陷域和相应预估指标。对某实例配电网系统开展算例分析, 验证了所提方法的有效性与优越性。

关键词: 电压暂降; 配电网; 传播方程; 凹陷域; 随机预估

Stochastic estimation method of voltage sags for a distribution network based on network propagation property

XIE Weilun, XUE Feng, HUANG Zhiwei

(Dongguan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Dongguan 523008, China)

Abstract: The wide application of sensitive loads increases the customer requirement for power quality. The rapid and efficient assessment of voltage sag is becoming important in voltage sag study. In this paper, a stochastic estimation method of voltage sags for a distribution network based on network propagation property is proposed. First, a voltage sag propagation path is searched based on distribution network topology. With the phase component method, the vertical/horizontal propagation property of voltage sag is derived. Then the voltage sag propagation equation in a distribution network from the fault source to the load side is established according to the path search results. Finally, the area of vulnerability and the estimation index are calculated by combining different fault types and line fault rates. An example analysis of a real distribution network is given to verify validity and superiority of this method.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company (No. GDKJXM-20180103).

Key words: voltage sag; distribution network; propagation equation; area of vulnerability; stochastic estimation

0 引言

电力系统中敏感设备的增多使得由电压暂降导致的生产经济损失日益严重, 逐渐成为电能质量事件中最受关注的问题之一^[1-2]。电压暂降一般定义为供电电压均方根值快速下降至额定值的10%~90%、持续时间为0.5周波至30周波的电能质量事件^[3-5]。电压暂降的发生具有随机性, 系统中不可预测的短路故障是引起电压暂降的主要起因^[6-7], 这给系统及用户解决电压暂降问题带来了巨大挑战。对电压暂降进行准确预估以有效应对这一挑战, 已经成为国

内外当前的研究热点。

电压暂降的预估方法主要包括实时监测法和随机预估法。实时监测法所需成本高且监测周期长, 通常需要数十年统计才能达到足够精度^[8], 其应用具有很大局限; 随机预估法通过建立不同故障模型预估电压暂降水平, 包括临界距离法、故障点法和解析法。临界距离法^[9-11]根据电压分配器模型预估电压暂降幅值, 其计算简单且精度较高, 但仅适用于辐射状网络三相对称短路下的电压暂降预估。故障点法^[12-14]通过在系统中设置若干故障点, 利用仿真提取故障特征值以预估所关心节点的暂降特征。该方法能准确计及发电机、负荷特性, 适用于各类网络结构, 但由于需要大量仿真才能获得精确结果, 并不能满足大型网络的快速预估需求。解析法^[15-18]

基金项目: 中国南方电网公司科技项目资助 (GDKJXM-20180103)

式中: \mathbf{A} 为相序变换矩阵; $\alpha = e^{j120^\circ}$ 为旋转因子; \mathbf{B}_i 为节点 i 处的阻抗传递矩阵; $Z_i^{(012)}$ 为节点 i 至线路末端的等效序阻抗; $Z^{(012)}$ 为线路首端至线路末端的等效序阻抗, 可表示为

$$Z^{(012)} = \sum_{j=i}^{n-1} z_j^{(012)} + z_{loadn}^{(012)} \quad (8)$$

式中, $Z_{loadn}^{(012)}$ 为末端负荷 n 的等效阻抗。根据式(5), 暂降相电压幅值是关于线路阻抗与负荷等效阻抗的函数, 若负荷等效阻抗与线路阻抗已知, 非故障线路的电压暂降特征分布可根据节点位置快速求得。

为解决负荷等效阻抗对电压暂降特征值计算的影响, 本文提出了一种以稳态电压比代替阻抗传递矩阵中的阻抗比的改进算法。对式(6)所示的阻抗传递矩阵中的各序阻抗比进行变换, 可得到零序、负序的阻抗比与正序阻抗比的数值关系如式(9)。

$$\frac{Z_i^{(02)}}{Z^{(02)}} / \frac{Z_i^{(1)}}{Z^{(1)}} = \frac{\sum_{j=i}^n \frac{Z_j^{(02)}}{Z_{loadn}^{(02)}} + 1}{\sum_{j=1}^n \frac{Z_j^{(02)}}{Z_{loadn}^{(02)}} + 1} \times \frac{\sum_{j=1}^n \frac{Z_j^{(1)}}{Z_{loadn}^{(1)}} + 1}{\sum_{j=i}^n \frac{Z_j^{(1)}}{Z_{loadn}^{(1)}} + 1} \quad (9)$$

式中, $Z_j^{(02)}$ 为节点 j 和节点 $j+1$ 之间的各序等效阻抗。

由于故障分析时负荷阻抗通常采用恒阻抗模型且线路阻抗一般远小于负荷阻抗, 式(9)的值约为 1, 阻抗传递矩阵 \mathbf{B}_i 中的零序和负序阻抗比可近似用正序阻抗比替代, 于是, 式(5)可变换为

$$U_{i,ABC}^f \approx \mathbf{A}^{-1} \text{diag}\left(\frac{Z_i^{(1)}}{Z^{(1)}}, \frac{Z_i^{(1)}}{Z^{(1)}}, \frac{Z_i^{(1)}}{Z^{(1)}}\right) \mathbf{A} \times \mathbf{T}U_{1,ABC}^f = \frac{Z_i^{(1)}}{Z^{(1)}} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{T}U_{1,ABC}^f = \frac{Z_i^{(1)}}{Z^{(1)}} \mathbf{T}U_{1,ABC}^f \quad (10)$$

根据式(10), 电压暂降在非故障线路的传播特性中的故障参数比可近似由正序参数比代替, 其特征分布主要由正序阻抗决定, 呈现出稳态特征。由于负荷等效阻抗难以求得, 实用计算中可利用稳态电压比代替正序阻抗比。设 U_i^{pref} 为节点 i 的稳态电压, 式(10)可改写为

$$U_{i,ABC}^f \approx \frac{Z_i^{(1)}}{Z^{(1)}} \mathbf{T}U_{1,ABC}^f = \left| \frac{U_i^{\text{pref}}}{U_1^{\text{pref}}} \right| \mathbf{T}U_{1,ABC}^f \quad (11)$$

1.2.2 故障线路传播特性

将故障源所在支路称为故障线路, 电压暂降在故障线路传播时, 其特征值计算本质上是一种电力系统短路计算。我国配电网主要是单端供电的辐射形网络, 系统发生短路时, 短路点将吸收网络中其余节点发出的电流, 仅故障馈线上存在较大短路电

流^[21-22]。将故障线路上的待求节点视为公共连接点(Point of Common Coupling, PCC), 电源至 PCC 点的线路阻抗为 Z_S , PCC 点至故障点的线路阻抗称为 Z_F 。假设故障前电源 $E=1$, 文献[23]分析了不同系统接地方式下各类型故障引起的暂降相电压特征, 各相暂降电压计算式见附表 1。

2 基于传播特性的配电网随机预估方法

2.1 传播路径搜索

电压暂降的特征值计算需沿传播路径进行, 研究快速的配电网电压暂降的传播路径搜索方法是首要解决的问题。以图 2 所示的某实例配电网为例, 定义电源节点 1 为父根节点, 节点 5 和节点 11 为节点 4 的两个分支, 称节点 4 为节点 5、11 的子根节点, 于是得到辐射状配电网中电压暂降的传播路径搜索原则如下。

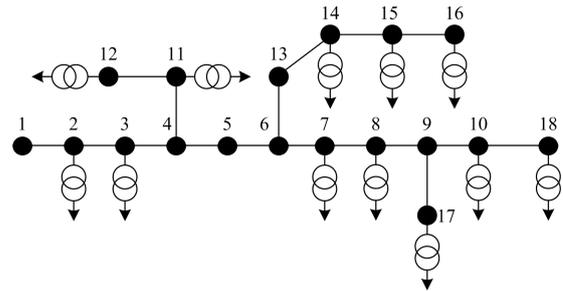


图 2 实例配电网

Fig. 2 Real distribution network

(1) 从父根节点开始搜索, 以电压下降最快为导向, 搜索同一子根节点的最低电压分支, 将其视为故障路径上节点。

(2) 搜索过程中, 以确认的子根节点的最低电压分支为新的故障路径搜索始端, 逐层向下搜索, 直至故障点, 从而完成故障路径搜索。

(3) 除故障路径外, 配网中其余支路称为非故障路径, 将各非故障支路与故障支路的公共连接点视为电压暂降在非故障支路上传播的起始点。

假设图 2 所示配电网中线路 10-18 发生故障, 按以上原则进行全网搜索, 可得到如图 3 所示的电

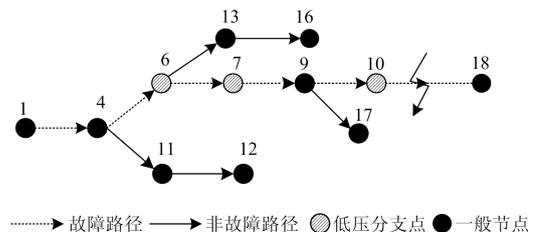


图 3 实例配电网

Fig. 3 Real distribution network

压暂降传播路径。根据电压暂降的传播特性，即可以准确计算全网的电压暂降特征值分布。

2.2 传播特性方程

利用传播路径搜索方法，将配电网划分为故障路径和非故障路径。假设节点 m 为敏感负荷节点，若节点 m 位于故障路径，则将节点 m 视为 PCC 点，根据附表 1 可以得到不同故障类型下节点 m 的暂降电压幅值；若节点 m 位于非故障路径，则将该非故障路径与故障路径的公共连接点视为 PCC 点(设为节点 i)，类似地利用附表 1 计算 PCC 点暂降电压，进而将 PCC 点视为该非故障路径的始端，利用式(11)计算节点 m 的暂降电压。配电网中电压暂降的传播特性方程可表示为

$$U_{load,ABC}^f = \begin{cases} T \times f_{ABC}(Z_S, Z_F) & m \in C \\ T \times f_{ABC}(Z_S, Z_F) \times \frac{U_m^{pref}}{U_i^{pref}} & m \notin C \end{cases} \quad (12)$$

式中： $U_{load,ABC}^f$ 表示节点 m 所接负荷的暂降电压向量； T 表示配网中配电变压器的等效传递矩阵； $f_{ABC}(Z_S, Z_F)$ 为根据附表 1 得到的暂降电压计算式； C 为故障路径节点集； Z_S 和 Z_F 均为故障位置的函数。

2.3 电压暂降随机预估流程

电压暂降凹陷域^[8]是指系统中发生故障引起电压暂降，导致敏感负荷节点电压幅值低于阈值电压，从而不能正常工作的故障点所在区域。假设配电网中任意两节点 p 、 q 间发生故障，故障位置 λ 定义为节点 p 和故障点 f 之间的线路长度和与线路 p - q 长度之比。根据式(12)所示的暂降电压方程计算节点 m 的电压暂降凹陷域，结合线路故障率，即可得到该节点的期望暂降频次^[8](Expected Sag Frequency, ESF)。

根据式(12)，故障路径上 PCC 点的暂降电压主要由关于故障位置的函数 Z_S 和 Z_F 决定，当 PCC 点位置一定，该点的电压暂降幅值随着故障点距电源节点电气距离的增大而增大。实际暂降凹陷域计算中，可首先假设故障点位于故障路径末端，从而计算节点 m 暂降电压幅值，若计算结果小于给定的负荷电压阈值，则故障路径全线在凹陷域内，否则，可通过计算临界故障距离得到暂降凹陷域边界，从而简化计算。本文所提出的基于网络传播特性的电压暂降随机预估方法流程如图 4 所示。

3 算例分析

为验证本文所提方法的合理性与有效性，对图 2 所示的实例配电网进行算例分析，网络中线路、配电变压器及负荷相关参数见附表 2。

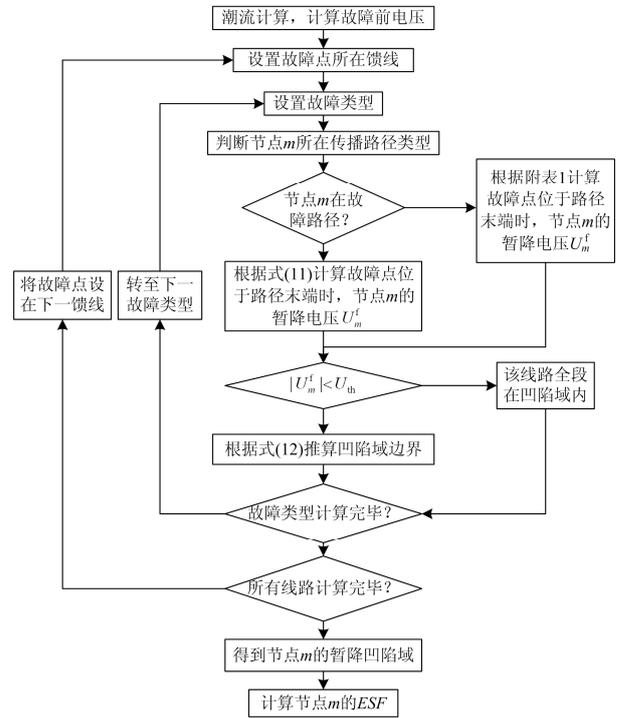


图 4 电压暂降预估流程

Fig. 4 Flow chart of voltage sag estimation

3.1 电压暂降幅值计算分析

我国配电网一般由单端供电，呈辐射状运行，位于故障路径上故障源后的节点的电压幅值通常远低于设备的正常工作电压^[21]，本文仅对位于故障源之前的节点的电压暂降幅值进行计算。假设该实例配电网中所发生故障均为金属性故障，节点 8 发生 BC 相相间短路故障，则线路 1-18 为电压暂降传播的故障路径。基于网络传播特性的电压暂降幅值计算值和仿真值对比见图 5 和表 1。

由于忽略了非故障路径的短路电流，传播特性法的计算结果一般略高于实际值，节点暂降幅值随

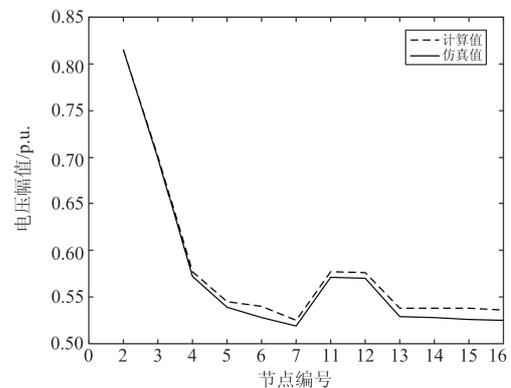


图 5 实例配网电压暂降幅值

Fig. 5 Sag magnitude of real distribution network

表 1 实例配网节点暂降幅值

Table 1 Sag magnitude of real distribution network

| 节点 | 计算值 | 仿真值 |
|----|-------|-------|
| 2 | 0.815 | 0.815 |
| 3 | 0.701 | 0.699 |
| 4 | 0.577 | 0.572 |
| 5 | 0.545 | 0.539 |
| 6 | 0.540 | 0.528 |
| 7 | 0.525 | 0.519 |
| 11 | 0.577 | 0.571 |
| 12 | 0.576 | 0.570 |
| 13 | 0.538 | 0.529 |
| 14 | 0.538 | 0.528 |
| 15 | 0.538 | 0.526 |
| 16 | 0.536 | 0.525 |

随着与故障源的电气距离减小而减小。故障路径的线路阻抗主要分布于线路 1-4, 对于其后的节点, 由于暂降电压方程中 Z_S 远大于 Z_F , 故障位置变化对暂降幅值影响较大, 导致线路 4-7 计算值的误差大于线路 1-4; 而非故障路径的暂降幅值计算误差取决于该路径首端节点暂降幅值的计算误差, 因此, 线路 6-16 的暂降幅值计算误差大于线路 4-12。

表 2 和图 6 给出了单相接地短路故障源在线路

表 2 不同故障位置节点 2 暂降幅值

Table 2 Sag magnitude of node 2 in different places

| 故障节点 | 计算值 | 仿真值 |
|------|-------|-------|
| 3 | 0.408 | 0.406 |
| 4 | 0.616 | 0.612 |
| 5 | 0.657 | 0.649 |
| 6 | 0.665 | 0.658 |
| 7 | 0.687 | 0.677 |
| 8 | 0.743 | 0.734 |
| 9 | 0.747 | 0.735 |
| 10 | 0.752 | 0.743 |
| 18 | 0.786 | 0.778 |

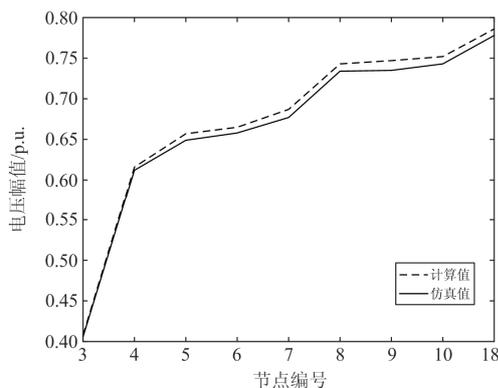


图 6 不同故障位置节点 2 电压暂降幅值

Fig. 6 Voltage sag magnitude of node 2 of different fault location

3-18 上移动时, 节点 2 的电压暂降幅值计算值和仿真值的对比结果。根据图 6, 节点 2 暂降幅值随着故障源与电源节点间电气距离的增大而增大。由于线路 3-4 上阻抗较大, 当故障源在线路 3-4 上移动时, 节点 2 的暂降幅值增长较快, 随后的暂降幅值曲线变化较为平缓。

3.2 电压暂降凹陷域计算分析

假设节点 2 为敏感负荷接入节点, 对应电压暂降阈值 $U_{th}=0.8$ p.u., 不同故障类型导致的故障相电压凹陷域如图 7 和表 3 所示。

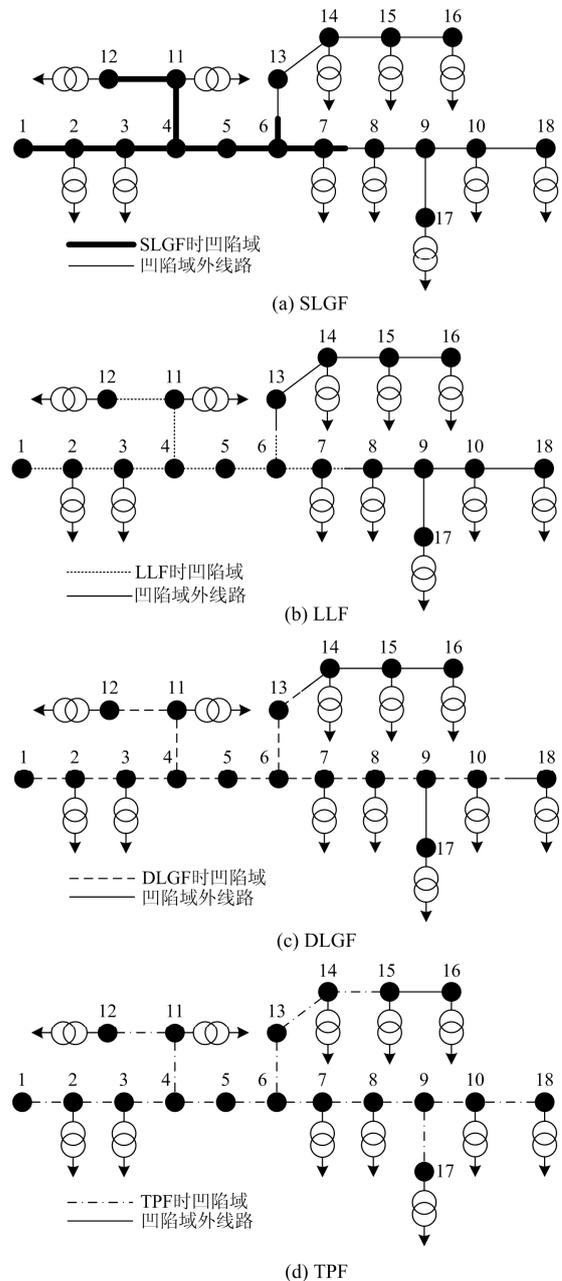


图 7 节点 2 凹陷域

Fig. 7 Area of vulnerability of node 2

图 7(a)—图 7(d)中所标志部分分别为三相短路故障、单相接地故障(A 相为故障相)、相间短路故障(BC 为故障相)和相间接地短路故障(BC 相为故障相)对应的节点 2 所接敏感负荷的电压暂降凹陷域。由图可知,各类型故障所造成的凹陷域从大到小依次为三相短路故障(TPF)、两相接地短路故(DLGF)、两相相间短路故障(LLF)和单相接地短路故障(SLGF)。

表 3 所示为节点 2 电压暂降凹陷域的具体计算结果。由于电压暂降幅值随着节点 2 与故障源之间电气距离的增大而增大,该节点的凹陷域一般位于各支路近电源侧。

表 3 节点 2 凹陷域

Table 3 Area of vulnerability of node 2

| 线路 | 电压暂降凹陷域 | | | |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | TPF | SLGF | LLF | DLGF |
| 1-2 | [0,1] | [0,1] | [0,1] | [0,1] |
| 2-3 | [0,1] | [0,1] | [0,1] | [0,1] |
| 3-4 | [0,1] | [0,1] | [0,1] | [0,1] |
| 4-5 | [0,1] | [0,1] | [0,1] | [0,1] |
| 5-6 | [0,1] | [0,1] | [0,1] | [0,1] |
| 6-7 | [0,1] | [0,1] | [0,1] | [0,1] |
| 7-8 | [0,1] | [0,0.225] | [0,0.586] | [0,1] |
| 8-9 | [0,1] | — | — | [0,1] |
| 9-10 | [0,1] | — | — | [0,1] |
| 4-11 | [0,1] | [0,1] | [0,1] | [0,1] |
| 11-12 | [0,1] | [0,1] | [0,1] | [0,1] |
| 6-13 | [0,1] | [0,0.422] | [0,0.712] | [0,1] |
| 13-14 | [0,1] | — | — | [0,0.322] |
| 14-15 | [0,0.987] | — | — | — |
| 15-16 | — | — | — | — |
| 9-17 | [0,1] | — | — | [0,0.258] |
| 10-18 | [0,1] | — | — | [0,0.132] |

故障点法通过在线路上设置若干故障点进行仿真得到电压暂降特征值,可准确根据网络特点得到电压暂降预估结果。在各线路上均匀设置 10 个故障点,以故障点法的凹陷域计算结果作为预估标准,验证基于网络传播特性得到的电压暂降预估结果的正确性。

表 4 给出了故障点法与本文所提传播特性法的电压暂降凹陷域计算值差异部分对比。由于敏感负荷接入节点与电源节点间的线路阻抗很大,该配电网内的暂降相电压总是很小,即使忽略非故障路径

上的短路电流,导致的凹陷域差异部分的计算误差仅为 0.91%,证明了所提的传播特性法的精确性。然而,传统方法需要遍历全网计算暂降凹陷域,而传播特性法只需在每一条支路做一次运算,计算效率显著提高。

表 4 实例配电网凹陷域

Table 4 Area of vulnerability of real distribution network

| 故障类型 | 线路 | 传播特性法 | 故障点法 |
|------|-------|-----------|-----------|
| TPF | 14-15 | [0,0.987] | [0,0.979] |
| SLGF | 7-8 | [0,0.225] | [0,0.211] |
| | 6-13 | [0,0.422] | [0,0.414] |
| LLF | 7-8 | [0,0.586] | [0,0.577] |
| | 6-13 | [0,0.712] | [0,0.698] |
| DLGF | 13-14 | [0,0.322] | [0,0.310] |
| | 9-17 | [0,0.258] | [0,0.247] |
| | 10-18 | [0,0.132] | [0,0.126] |

3.3 电压暂降频次预估

根据统计,该配电网在单相接地、两相相间短路、两相接地短路及三相短路故障下的线路故障率分别为 0.42、0.026 3、0.063 和 0.022 次/km/年,故障概率沿线路均匀分布,计算节点 2 的 ESF 指标。根据表 5 的计算结果,对敏感负荷节点 2 影响较大的故障类型依次为单相接地故障、相间接地短路故障、三相短路故障和相间短路故障。

表 5 节点 2 期望暂降频次

Table 5 ESF of node 2

| 电压阈值/p.u. | ESF 指标/(次/年) | | | | |
|-----------|--------------|---------|---------|---------|-------|
| | SLGF | LLF | DLGF | TPF | 总指标 |
| 0.8 | 3.893 1 | 0.256 1 | 0.737 6 | 0.362 2 | 5.249 |

4 结论

本文针对配电网系统提出一种基于网络传播特性的电压暂降随机预估方法,通过传播路径搜索法将配电网划分为故障及非故障路径,根据电压暂降的传播特性,针对三相短路、单相接地短路、两相相间短路和两相接地短路四种故障类型分别建立了故障源至负荷侧的电压暂降传播方程,求解故障相凹陷域。算例分析表明利用稳态电压代替等效阻抗的传播特性法,计算过程简单且预估精度较高,相比传统方法能更有效地解决配电网中的电压暂降的随机预估问题。

附录 A

附表 1 不同系统接地方式下各类故障引起的电压暂降

Attached table 1 Voltage sags caused by different faults with different grounding modes

| 故障类型 | 系统类型 | 相电压 |
|-----------------|-------|---|
| 单相接地 (A 相为例) | 有效接地 | $\begin{cases} U_a = V \\ U_b = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}, V = \frac{Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}}{Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0} + Z_{s1} + Z_{s2} + Z_{s0}} \\ U_c = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{cases}$ |
| | 非有效接地 | 同上 |
| 两相短路 (BC 相例) | 有效接地 | $\begin{cases} U_a = 1 \\ U_b = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}V, V = \frac{Z_{F1}}{Z_{F1} + Z_{s1}} \\ U_c = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}V \end{cases}$ |
| | 非有效接地 | 同上 |
| 两相接地 (BC 相例) | 有效接地 | $\begin{cases} U_a = 1 \\ U_b = (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})V, V = \frac{Z_{F1}}{Z_{F1} + Z_{s1}} \\ U_c = (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})V \end{cases}$ |
| | 非有效接地 | $\begin{cases} U_a = \frac{3}{2} \\ U_b = j\frac{\sqrt{3}}{2}V, V = \frac{Z_{F1}}{Z_{F1} + Z_{s1}} \\ U_c = j\frac{\sqrt{3}}{2}V \end{cases}$ |
| 三相短路 | 有效接地 | $\begin{cases} U_a = V \\ U_b = (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})V, V = \frac{Z_{F1}}{Z_{F1} + Z_{s1}} \\ U_c = (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})V \end{cases}$ |
| | 非有效接地 | 同上 |

附表 2 不同系统接地方式下各类故障引起的电压暂降

Attached table 2 Voltage sags caused by different faults with different grounding modes

| 线路 $i-j$ | 导线型 | 长度/km | 节点 j 负荷/kVA | 配电变压器 j |
|----------|--------|----------|---------------|--------------|
| 1-2 | LGJ-35 | 1.839 23 | 2.641+0.869i | S11-200/10 |
| 2-3 | LGJ-35 | 1.266 5 | 3.17+1.042i | S11-100/10 |
| 3-4 | LGJ-35 | 1.679 05 | 0 | — |
| 4-5 | LGJ-35 | 0.582 53 | 0 | — |
| 5-6 | LGJ-35 | 0.114 88 | 0 | — |
| 6-7 | LGJ-35 | 0.386 77 | 25.691+8.444i | S11-125/10 |
| 7-8 | LGJ-35 | 1.298 43 | 5.943+1.953i | S11-400/10 |
| 8-9 | LGJ-35 | 0.090 22 | 0 | — |
| 9-10 | LGJ-35 | 0.172 06 | 7.469+2.455i | S11-M-200/10 |
| 4-11 | LJ-70 | 0.241 45 | 11.469+3.769i | S11-160/10 |
| 11-12 | LJ-70 | 1.180 71 | 3.877+1.274i | S11-100/10 |
| 6-13 | LGJ-35 | 1.610 48 | 1.204+0.396i | S9-100/10 |
| 13-14 | LGJ-35 | 1.527 95 | 1.966+0.646i | S11-M-100/10 |
| 14-15 | LJ-70 | 0.985 15 | 1.987+0.653i | S9-20/10 |
| 15-16 | LJ-70 | 0.708 15 | 1.428+0.469i | S9-30/10 |
| 9-17 | LJ-70 | 2.318 59 | 3.646+1.198i | S11-M-100/10 |
| 10-18 | LGJ-35 | 1.180 55 | 2.228+0.732i | S11-M-100/10 |

参考文献

- [1] 郑志宇, 李雅倩, 谢雪景, 等. 基于全寿命周期成本的电压暂降治理设备综合配置规划[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 128-134.
ZHENG Zhiyu, LI Yaqian, XIE Xuejing, et al. Allocation plan of voltage sags mitigation devices based on life cycle cost[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 128-134.
- [2] 周鹿鸣, 张宏宇, 宝海龙, 等. 规模化热泵对配电网运行特性和电能质量影响分析[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(5): 74-82.
ZHOU Luming, ZHANG Hongyu, BAO Hailong, et al. The impact analysis of large scale air source heat pumps on operation characteristics and power quality of distribution networks[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(5): 74-82.
- [3] 林爽, 秦萃丽. 模糊层次分析法在电能质量综合评估中的应用研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(1): 72-77.
LIN Shuang, QIN Cuili. Application of fuzzy analytic hierarchy process in comprehensive evaluation of power quality[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(1): 72-77.
- [4] 崔灿, 肖先勇, 吴奎华, 等. 基于 HHT 和特征离散化的电压暂降扰动源分类特征提取[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 8-15.
CUI Can, XIAO Xianyong, WU Kuihua, et al. Feature extraction in classification of voltage sag sources based on HHT and feature discretization[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 8-15.
- [5] MENSOU S, ESSADKI A, NASSER T, et al. A direct power control of a DFIG based WECS during symmetrical voltage dips[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, (1): 36-47. DOI 10.1186/s41601-019-0148-y.
- [6] LI Zhengming, LI Wenwen, PAN Tianhong. An optimized compensation strategy of DVR for micro-grid voltage sag[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 78-85. DOI 10.1186/s41601-016-0018-9.
- [7] 张嫣, 林涌艺, 邵振国. 电压暂降可观约束下的定位监测点多目标优化配置[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2375-2383.
ZHANG Yan, LIN Yongyi, SHAO Zhenguo. Multi-objective optimal allocation of monitors for voltage sag location under observability constraint[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(11): 2375-2383.
- [8] PARK C H, JANG G. Systematic method to identify an area of vulnerability to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1583-1591.
- [9] 杨剑锋, 姜爽, 石戈戈. 基于分段改进 S 变换的复合电能质量扰动识别[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 64-71.
YANG Jianfeng, JIANG Shuang, SHI Gege. Classification of composite power quality disturbances based on piecewise-modified S transform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 64-71.
- [10] MOSCHAKIS M N, HATZIARGYRIOU N D. Analytical calculation and stochastic assessment of voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1727-1734.
- [11] MARTINEZ J A, MARTIN-ARNEDO J. Voltage sag studies in distribution networks-part I: system modeling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1670-1678.
- [12] 周超, 田立军, 侯燕文, 等. 基于监测点优化配置的电压暂降故障点定位估计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 102-107.
ZHOU Chao, TIAN Lijun, HOU Yanwen, et al. Fault location estimation based on optimal voltage sag monitoring program[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 102-107.
- [13] 周林, 吴红春, 孟婧, 等. 电压暂降分析方法研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 1010-1016.
ZHOU Lin, WU Hongchun, MENG Jing, et al. Study of the voltage sag analysis methods[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 1010-1016.
- [14] ZAMBRANO X, HERNANDEZ A, IZZEDDINE M, et al. Estimation of voltage sags from a limited set of monitors in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 656-665.
- [15] 杨晓东, 李庚银, 周明, 等. 电压暂降随机预估的自适应信赖域方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 39-44.
YANG Xiaodong, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Adaptive trust region method for stochastic estimation of voltage sags[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 39-44.
- [16] 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.
- [17] WOOLLEY N C, AVENDAÑO-MORA M, WOOLLEY A P, et al. Probabilistic estimation of voltage sags using

- erroneous measurement information[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 106: 142-150.
- [18] LIAO Yuan. Fault location for single-circuit line based on bus-impedance matrix utilizing voltage measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 23(2): 609-617.
- [19] 徐永海, 兰巧倩, 孔祥雨, 等. 电压暂降特征值统计分析及暂降传播特性[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 165-175.
XU Yonghai, LAN Qiaoqian, KONG Xiangyu, et al. Statistical analysis of voltage sag characteristics and research on sag propagation property[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 165-175.
- [20] 吕干云, 蒋小伟, 郝思彭, 等. 基于半监督支持向量机的电压暂降源定位[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 76-81.
LÜ Ganyun, JIANG Xiaowei, HAO Sipeng, et al. Location of voltage sag source based on semi-supervised SVM[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 76-81.
- [21] WANG B, XU W, PAN Z. Voltage sag state estimation for power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 806-812.
- [22] 王宾, 潘贞存, 徐文远. 配电系统电压跌落幅值估算分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 32-37.
- WANG Bin, PAN Zhencun, XU Wenyuan. Voltage sag profile estimation for power distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 32-37.
- [23] 肖湘宁, 陶顺. 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(一)[J]. 电工技术学报, 2007, 22(9): 143-147.
XIAO Xiangning, TAO Shun. Voltage sags types under different grounding modes of neutral and their propagation: part I[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(9): 143-147.

收稿日期: 2019-06-12; 修回日期: 2019-07-20

作者简介:

谢伟伦(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电能质量监测、电表、新技术研究与应用工作; E-mail: 1325590452@qq.com

薛峰(1973—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为交流调速、变结构控制和电力电子技术应用工作; E-mail: 3195822139@qq.com

黄志威(1988—), 男, 学士, 助理工程师, 从事电测仪表、电能质量监测和分析方向的技术应用工作。E-mail: 18633646608@qq.com

(编辑 葛艳娜)