

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.02.005

基于黄金分割搜索的电压暂降域快速识别方法

雷敏, 汤迪虎, 兰征, 李勇, 吴艺松

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对大型复杂电网中敏感负荷的电压暂降域难以准确识别的问题, 提出一种基于黄金分割搜索的电压暂降域快速识别方法。首先, 求得网络中发生各类短路故障时敏感负荷节点的电压暂降幅值解析式, 并引入节点判定向量和线路关联向量, 以及相应的判定准则, 实现对所有线路临界点的快速分类计算; 接着详细阐述了传统插值法存在的问题, 并提出一种由黄金分割搜索改进的插值法, 以期为正割迭代提供更优的初值点, 提高临界点计算的准确度; 因考虑到拟合的二次曲线难免存在偏差, 故使用故障点法作为补充算法, 用以计算有求解困难的线路; 最后, 以IEEE30节点标准测试系统为例, 验证了该方法能在保证计算精度的前提下, 简化电压暂降域的求解过程, 提高算法的收敛速度, 并广泛适用于大型复杂电网。

关键词: 电压暂降; 敏感负荷; 临界点; 暂降域; 黄金分割搜索

中图分类号: TM712.1⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2024)02-0025-08

引文格式: 雷敏, 汤迪虎, 兰征, 等. 基于黄金分割搜索的电压暂降域快速识别方法 [J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(2): 25-32.

A Fast Identification Method of Voltage Sag Domain Based on Golden Section Search

LEI Min, TANG Dihu, LAN Zheng, LI Yong, WU Yisong

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the difficulty in accurately identifying the voltage sag domain of sensitive loads in large and complex power grids, a fast voltage sag domain identification method has thus been adopted based on golden section search. Firstly, an analytical formula can be obtained for the voltage temporary drop amplitude of sensitive load nodes in the network when various types of short circuit faults occur, with the node judgment vector, line correlation vector and corresponding judgment criteria to be introduced to realize a fast classification calculation of all line critical points. Then, a detailed elaboration has been made of the traditional interpolation methods, with an improved interpolation method proposed on the basis of golden section search, which helps to provide better initial values for secant iteration, thus improving the accuracy of critical point calculation. In view of the inevitable deviation of the fitted quadratic curves, the fault point method is adopted as a supplementary algorithm to calculate routes that are difficult to solve. Finally, taking the IEEE30-node standard testing system as an example, it is verified that the proposed method can simplify the solution process of voltage sag domain, and improve the convergence speed of the algorithm on the premise of ensuring calculation accuracy, which makes it widely applicable to large and complex power grids.

Keywords: voltage sag; sensitive load; critical point; vulnerable area; golden section search

收稿日期: 2023-10-26

基金项目: 湖南省教育厅优秀青年基金资助项目(22B0603); 湖南省研究生科研创新基金资助项目(QL20230258)

作者简介: 雷敏, 女, 湖南工业大学研究员, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为复杂网络理论及其在电网稳定性分析中的应用, E-mail: leimin0606@hotmail.com

通信作者: 兰征, 男, 湖南工业大学副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为分布式电源并网技术, 微电网控制和柔性电能调控技术等, E-mail: lan@hut.edu.cn

1 研究背景

电压暂降是一种严重的电能质量问题,当供电母线发生电压暂降时,大量敏感负荷无法获得所需电压,其工作性能将受到影响,严重时还会使设备停运,从而造成重大经济损失。因此,电压暂降成为了敏感负荷占比很高的现代工业配电网中亟需解决的电能质量问题^[1-4]。电压暂降,是指电力系统中由于短路故障或大负荷投入等原因,导致电压有效值快速跌落至额定电压的10%~90%,并且持续时间为0.5周波至1 min的电能质量问题^[5],输电线路的短路故障是电压暂降的主要成因^[6],且敏感负荷是否受电压暂降的影响,与自身对电压暂降的耐受性、所处位置及输电线路的故障点位置等有关^[7]。电压暂降域是指配电网中某条线路发生故障时,导致所关心节点电压降低至某个阈值以下的故障点所在区域^[8]。电压暂降域可直观地反映线路故障对敏感负荷的影响程度和范围,是电压暂降综合评估的基础与前提,为电网规划、改造及敏感用户选址提供了理论依据和数据支撑。

目前,已有多种方法被用于识别电压暂降域,如临界距离法、故障点法和解析式法等。临界距离法^[9],是通过计算导致配电网中敏感负荷发生电压暂降的临界故障点及该点与敏感负荷所在母线距离,可实现对电压暂降域的识别,该法计算速度较快,但只适用于辐射型配电网。故障点法^[10],是指在电路上选定一些虚拟故障点,通过短路计算方法求取各故障点发生短路故障时敏感负荷所在母线电压暂降幅值信息,用以判断该虚拟故障点是否处于敏感负荷的电压暂降域内,该法原理简单,但其较高的计算精度需要设置数量较多的故障点。如要达0.1%精度,则需在配电网中每条线路上设置1 000个虚拟故障点,因此计算量较大,且故障点的布置方法也没有统一标准。解析式法^[11-12],是在综合考虑临界距离法和故障点法优缺点的基础上,利用电力系统短路故障进行分析而提出的一种根据暂降幅值解析式计算电压暂降域的方法。但是在求解电压暂降解析式与暂降阈值构成的故障电压方程时,使用的数值方法较为单一,算法耗时较长。且在识别节点较多网络时,可能会因迭代初值点难以求解导致出现与实际不符的情况,从而不能适用于大型复杂电网。

针对上述情况,本文提出一种基于黄金分割搜索的电压暂降域快速识别方法,首先求得任一故障点处发生任意短路故障时,敏感负荷节点电压暂降幅值的解析式;然后引入节点判定向量和线路关联向量及相应判定准则,以此实现对临界点的分类计算;对采用

传统插值拟合曲线所存在的问题进行分析,提出一种由黄金分割搜索改进的二次插值法进行曲线拟合,该方法为正割迭代提供了更优的初值点,有利于提高临界点计算的准确度;最后采用故障点法作为补充算法,用以计算求解困难线路。在保证计算精度的同时,改善了算法的收敛速度,适用性广泛。

2 电压暂降解析式与临界点计算

2.1 基于暂降幅值计算的电压暂降解析式

本文主要考虑配电网中因短路故障所引起的敏感负荷发生电压暂降的情况。为精确找到每条线路上电压暂降域的临界点,需先通过对称分量法和短路分析得到敏感负荷所在母线电压暂降幅值。本文先根据短路情况给出4种故障工况下电压暂降幅值表达式。

1) 三相短路故障。当故障点 K 处发生三相短路故障时,由于属于对称平衡故障,故只考虑正序,且敏感负荷节点 S 处的三相电压暂降幅值相同,其某一相电压暂降幅值为

$$U_S^f = U_S^{pf} - (Z_{SK}^1 / Z_{KK}^1) U_K^{pf} \quad (1)$$

式中: U_S^f 为 S 点处电压暂降幅值; Z_{KK}^1 为正序自阻抗; Z_{SK}^1 为正序互阻抗; U_S^{pf} 为 S 点处故障前电压; U_K^{pf} 为 K 点处故障前电压。

由式(1)可知, S 点处的电压暂降幅值 U_S^f 与系统结构参数和系统发生故障前运行状态有关。当故障点 K 处发生以 A 相为特殊相的不对称短路故障时,需采用对称分量法进行分析。

2) 单相接地短路故障。当故障点 K 处发生以 A 相为特殊相的单相接地短路故障时, S 点处的三相电压暂降幅值分别如下:

$$\begin{cases} U_{A,S}^f = U_{A,S}^{pf} - \frac{Z_{SK}^0 + Z_{SK}^1 + Z_{SK}^2}{Z_{KK}^0 + Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} U_K^{pf}, \\ U_{B,S}^f = \alpha^2 U_{A,S}^{pf} - \frac{Z_{SK}^0 + \alpha^2 Z_{SK}^1 + \alpha Z_{SK}^2}{Z_{KK}^0 + Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} U_K^{pf}, \\ U_{C,S}^f = \alpha U_{A,S}^{pf} - \frac{Z_{SK}^0 + \alpha Z_{SK}^1 + \alpha^2 Z_{SK}^2}{Z_{KK}^0 + Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} U_K^{pf}. \end{cases} \quad (2)$$

3) 两相短路故障。当 B 相和 C 相发生两相短路故障时, S 点处的三相电压暂降幅值分别如下:

$$\begin{cases} U_{A,S}^f = U_{A,S}^{pf} - \frac{Z_{SK}^1 - Z_{SK}^2}{Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} U_K^{pf}, \\ U_{B,S}^f = \alpha^2 U_{A,S}^{pf} - \frac{\alpha^2 Z_{SK}^1 - \alpha Z_{SK}^2}{Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} U_K^{pf}, \\ U_{C,S}^f = \alpha U_{A,S}^{pf} - \frac{\alpha Z_{SK}^1 - \alpha^2 Z_{SK}^2}{Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} U_K^{pf}. \end{cases} \quad (3)$$

4) 两相接地短路故障。当 B 相和 C 相发生两相接地短路故障时, S 点处三相电压暂降幅值分别如下:

$$\begin{cases} U_{A,S}^f = U_{A,S}^{pf} - \frac{(Z_{SK}^1 - Z_{SK}^0)Z_{KK}^2 + (Z_{SK}^1 - Z_{SK}^2)Z_{KK}^0}{Z_{KK}^0 Z_{KK}^1 + Z_{KK}^1 Z_{KK}^2 + Z_{KK}^2 Z_{KK}^0} U_K^{pf}, \\ U_{B,S}^f = \alpha^2 U_{A,S}^{pf} - \frac{(\alpha^2 Z_{SK}^1 - Z_{SK}^0)Z_{KK}^2 + (\alpha^2 Z_{SK}^1 - \alpha Z_{SK}^2)Z_{KK}^0}{Z_{KK}^0 Z_{KK}^1 + Z_{KK}^1 Z_{KK}^2 + Z_{KK}^2 Z_{KK}^0} U_K^{pf}, \\ U_{C,S}^f = \alpha U_{A,S}^{pf} - \frac{(\alpha Z_{SK}^1 - Z_{SK}^0)Z_{KK}^2 + (\alpha Z_{SK}^1 - \alpha^2 Z_{SK}^2)Z_{KK}^0}{Z_{KK}^0 Z_{KK}^1 + Z_{KK}^1 Z_{KK}^2 + Z_{KK}^2 Z_{KK}^0} U_K^{pf}. \end{cases} \quad (4)$$

式(2)~(4)中: $U_{A,S}^f$ 、 $U_{B,S}^f$ 、 $U_{C,S}^f$ 分别为敏感节点 S 的三相电压暂降幅值; Z_{KK}^i ($i=0, 1, 2$)、 Z_{SK}^i 为正负零序自阻抗和互阻抗; $U_{A,S}^{pf}$ 为 S 点处故障前电压; U_K^{pf} 为 K 点处故障前电压; $\alpha = e^{j120^\circ}$ 为旋转因子。

由式(2)~(4)可知, 敏感节点 S 的三相电压暂降幅值与系统结构参数、系统发生故障前运行状态及旋转因子有关, 图1为电压暂降幅值计算示意图。

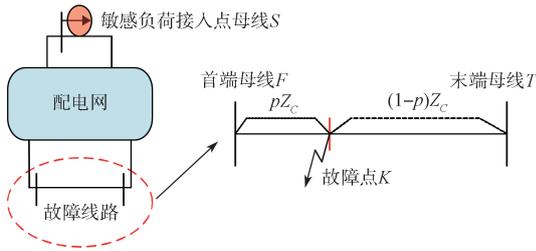


图1 电压暂降幅值计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram for the sag amplitude calculation

当短路故障发生在系统母线上时, 其自阻抗和互阻抗可以直接从节点阻抗矩阵中调用; 但是当短路故障发生在线路上的某一点时, 其自阻抗和互阻抗的计算需要通过引入位置变量 p 联立节点阻抗矩阵进行求取。如图1所示, 传输线路 $F-T$ 上 K 点发生短路故障时, 用位置变量 p ($0 \leq p \leq 1$) 定位故障点。 S 点为敏感负荷所在母线节点, Z_C 为线路 $F-T$ 的序阻抗。当故障点 K 在线路 $F-T$ 上移动时, 其三序自阻抗 Z_{KK}^{012} 和故障点 K 与 S 点间的三序互阻抗 Z_{SK}^i 皆可由目标网络阻抗矩阵 Z 和位置变量 p 表示^[13]:

$$Z_{KK}^{012} = p^2 (Z_{FF}^{012} + Z_{TT}^{012} - 2Z_{FT}^{012} - Z_C^{012}) + p [Z_C^{012} - 2(Z_{FF}^{012} - Z_{FT}^{012})] + Z_{FF}^{012}, \quad (5)$$

$$Z_{SK}^{012} = Z_{SF}^{012} + p(Z_{ST}^{012} - Z_{SF}^{012}). \quad (6)$$

式中: Z_{FF}^{012} 、 Z_{TT}^{012} 分别为系统母线节点 F 、 T 的各序自阻抗; Z_{FT}^{012} 、 Z_{SF}^{012} 、 Z_{ST}^{012} 分别为系统母线节点 F 和 T 的各序互阻抗、母线 F 和敏感负荷节点 S 之间的各序互阻抗、母线 T 和敏感负荷节点 S 之间的各序互

阻抗, 均可从系统节点阻抗矩阵中调用; Z_C^{012} 为节点 $F-T$ 间线路序阻抗。

此外, 故障点 K 发生故障前的电压 U_K^{pf} 也可用故障位置变量 p 来表示:

$$U_K^{pf} = U_F^{pf} + p(U_T^{pf} - U_F^{pf}), \quad (7)$$

式中, U_F^{pf} 、 U_T^{pf} 分别为母线 F 和 T 上的故障前电压, 可通过潮流计算得到。

因此 S 点的电压暂降幅值可由故障前电压和各序阻抗来表示。将式(5)~(7)代入式(1)~(4), 便可得任一故障点处发生任意短路故障时, S 点电压暂降幅值关于位置变量 p 的函数解析式 $U(p)$ 。

2.2 基于传统插值法的临界点计算限制

临界点是指配电网中导致敏感负荷所在母线处的电压暂降幅值等于敏感负荷电压暂降阈值的故障位置。保证临界点的计算准确性和计算速度是暂降域精准识别的关键, 需准确且快速求解故障电压方程 $U(p) = U_{th}$ (U_{th} 为敏感负荷电压暂降阈值)。然而关于变量 p 的故障电压方程高于4次, 因此普通求解方程方法并不适用计算临界点。求解高阶方程有几种数值分析方法, 其中 Newton-Raphson 方法(如式(8)所示)在大多数情况下有较快收敛速度。但因难以求得故障电压方程的微分解析表达式, 故不能直接应用此方法。此外, 在使用类似 Newton-Raphson 的开放型数值分析方法过程中, 并不能保证其收敛性。

$$p_{k+1} = p_k - U(p_k) / (U'(p_k)), \quad (k=0, 1, \dots) \quad (8)$$

虽然一些交叉型数值分析方法能够很好地保证系统收敛性, 但是收敛速度较慢, 因此在大型电力系统计算中并不高效。针对这一问题, 可先通过牛顿二次插值法求得当线路 $0 \leq p \leq 1$ 上发生短路故障时, 敏感负荷的近似暂降幅值曲线, 以及故障电压方程 $U_{th} = ap^2 + bp + c$ 。牛顿二次插值法如式(9)所示^[14]。

$$N_2(x) = U[p_0] + U[p_0, p_1](p - p_0) + U[p_0, p_1, p_2](p - p_0)(p - p_1). \quad (9)$$

式中: $U[p_0]$ 、 $U[p_0, p_1]$ 、 $U[p_0, p_1, p_2]$ 分别为 U 关于距离 p_0 的零阶均差、一阶均差和二阶均差, 可以由式(10)~(12)计算得到。

$$U[p_i] = U(p_i), \quad (10)$$

$$U[p_i, p_{i+1}] = \frac{U[p_{i+1}] - U[p_i]}{p_{i+1} - p_i}, \quad (11)$$

$$U[p_i, p_{i+1}, p_{i+2}] = \frac{U[p_{i+1}, p_{i+2}] - U[p_i, p_{i+1}]}{p_{i+2} - p_i}. \quad (12)$$

然而传统插值法在求取插值曲线时, 对系统中所有线路均采用 $p=0$ 、 $p=0.5$ 和 $p=1$ 作为插值点, 导致

在某些情况下, 计算所得结果会与实际电压暂降域有较大的偏差。即采用传统插值法拟合的二次曲线, 对临界点的计算会有一些的限制。

如图2所示, 当二次插值曲线的最大电压幅值远低于实际暂降幅值曲线的最大值时, 可能会误把整条线路计入暂降域中, 即故障电压方程无解。对于此种情况, 本文拟采用黄金分割搜索法改进的牛顿二次插值法, 以有效解决这一问题。采用黄金分割搜索法的目的是快速找到 $p_F \leq p \leq p_T$ ($p_F=0$, $p_T=1$) 中使得敏感负荷所在母线电压暂降幅值为最大值的点 p_{\max} , 而使用 p_{\max} 作为插值点, 可以保证拟合的二次插值曲线经过实际幅值曲线的最大值, 从而有效避免在临界点计算时可能出现与实际不相符的情况, 提高了临界点计算的准确性。

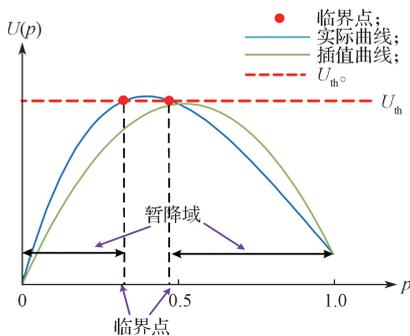


图2 实际幅值曲线与插值曲线对比

Fig. 2 Comparison between the actual amplitude curves and the interpolation curves

3 电压暂降域的识别

3.1 引入判定向量

敏感负荷的电压暂降域, 是指配电网线路发生短路故障时引起的敏感负荷节点电压降至最低耐受电压幅值以下, 从而使得敏感负荷不能正常工作的故障点所在区域。精准识别暂降域的关键是快速找出所有的故障临界点, 但若对网络中的所有线路都采用相同的计算方法, 就会出现一些重复且无意义的计算工作, 导致计算效率较低。对此, 本文通过判断电力系统中各母线和线路在暂降域中的被包含情况, 对网络中的所有线路进行分类, 从而针对性地采用不同的数值分析方法进行临界点位置的精确计算。

在进行线路分类时, 本文引入了一些判定向量及判定规则, 具体分析过程如下。

计算各母线短路故障时敏感负荷节点 S 的电压暂降幅值, 形成母线节点电压暂降幅值 n 维向量 U_S^f , 并与敏感负荷电压暂降阈值作比较, 得到差值向量 ΔU_S 。

$$\Delta U_S = \begin{bmatrix} \Delta U_{S,1} \\ \Delta U_{S,2} \\ \vdots \\ \Delta U_{S,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |U_{S,1}^f| \\ |U_{S,2}^f| \\ \vdots \\ |U_{S,n}^f| \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_{th} \\ U_{th} \\ \vdots \\ U_{th} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

式中: $U_{S,i}^f$ 为母线 i 发生短路故障时敏感负荷所在节点 S 的电压幅值。

通过判断 ΔU_S 向量元素的正负, 便可知各节点是否处在敏感节点的暂降域之内, 因此, 引入节点判定向量 B :

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{cases} 1, & \Delta U_{S,i} \leq 0; \\ 0, & \Delta U_{S,i} > 0. \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可知, $B_i=1$ 表示母线 i 在敏感负荷所对应的电压暂降域之内; $B_i=0$ 则表示母线 i 在敏感负荷所对应的电压暂降域之外。由此, 为判断每条线路在暂降域中的包含情况, 引入线路关联向量 L :

$$L = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{1,F} + B_{1,T} \\ B_{2,F} + B_{2,T} \\ \vdots \\ B_{m,F} + B_{m,T} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

式中: $B_{i,F}$ 和 $B_{i,T}$ 为连接线路母线暂降判定因子。

观察式(15)可知, L_i 的取值由连接线路 i 的两个母线暂降判定因子的代数和决定。因此, L_i 可取值 0, 1, 2, 其代表的物理意义如下:

1) $L_i=0$, 表明线路 i 所连接的两条母线都在电压暂降域之外, 则可知线路 i 也完全位于暂降域之外, 且线路 i 上没有临界点。

2) $L_i=1$, 表明线路 i 所连接的两条母线中, 有一条位于电压暂降域之内。如图3所示, 则可知线路 i 部分位于暂降域之内, 且线路上存在唯一的临界点。

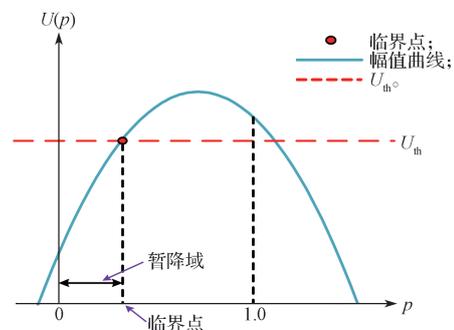


图3 $L_i=1$ 时临界故障点示意图

Fig. 3 Critical fault point schematic diagram with $L_i=1$

3) $L_i=2$, 表明线路 i 所连接的两条母线均位于电压暂降域之内。 $L_i=2$ 时的临界故障点示意图如图4

所示,由图可知,线路*i*将部分或全部位于暂降域以内,也就意味着线路*i*存在2个或0个临界点,此时先求得电压暂降幅值曲线的最大值,再将其与电压阈值 U_{th} 比较大小,即可确定线路上的临界点个数。

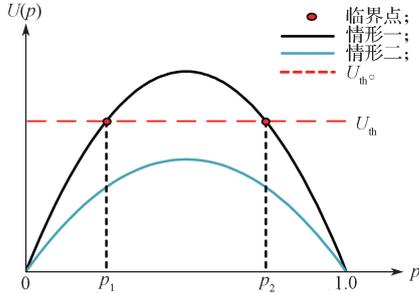


图4 $L_i=2$ 时临界故障点示意图

Fig. 4 Critical fault point schematic diagram with $L_i=2$

因此,只有当 L_i 取值1或2时,才需要进一步计算线路上的临界点,从而减少了计算时间。

3.2 电压暂降域识别方法及改进

由上述分析可知网络中所有线路上临界点的个数和分布情况,本文为在保证算法精度的前提下提高计算速度,采用了多种数值分析方法进行临界点位置的精确计算,从而快速地识别出电压暂降域,算法流程图如图5所示。

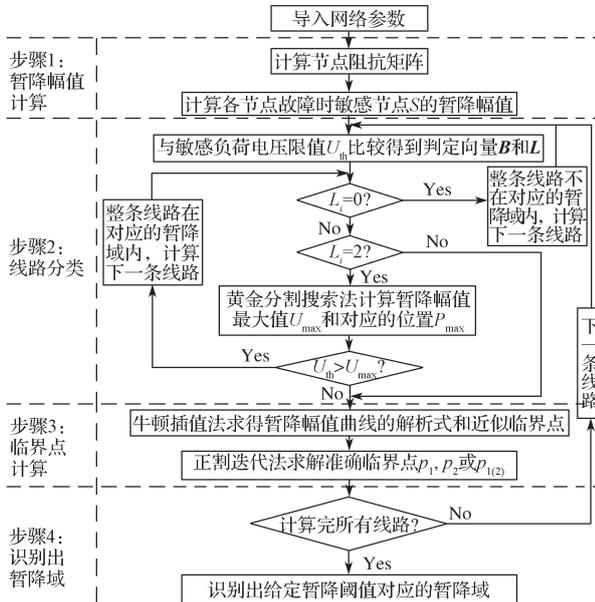


图5 电压暂降域求解算法流程图

Fig. 5 Flowchart of sag domain solving algorithm

电压暂降域具体计算步骤如下:

1) 暂降幅值计算。根据给定系统网络参数,通过追加支路法或导纳矩阵求逆计算网络各序节点阻抗矩阵,并用式(1)~(4)得到各节点发生不同类型短路故障时敏感负荷所在节点电压暂降幅值。

2) 线路分类。由步骤1得到敏感负荷所在节点

电压暂降幅值向量 U_s^f ,按式(13)~(15)计算得节点判定向量 B 和线路关联向量 L ,并对所有线路进行逐条遍历。若 $L_i=0$,表明线路不在电压暂降域内,直接计算下一条线路;若 $L_i=1$,表明此线路首末节点中有1个节点在暂降域内,则可知线路*i*部分位于暂降域内,且线路上存在唯一临界点;若 $L_i=2$,表明此线路首末节点均在暂降域内,则先采用黄金分割搜索法求解电压暂降幅值曲线的最大值 U_{max} ,并将其与敏感负荷电压暂降阈值 U_{th} 进行比较。若 $U_{max} < U_{th}$,说明此线路完全处于暂降域内,不存在临界点,则直接计算下一条线路;若 $U_{max} \geq U_{th}$,说明线路*i*部分位于暂降域内,且线路上存在2个临界点。

3) 临界点计算。只需对步骤2中 $L_i=1, 2$ 的情况进行临界点的计算。 $L_i=1$ 时,直接使用 $(0, U_F)$ 、 $(0.5, U_{0.5})$ 和 $(1, U_T)$ 3点作为插值点,通过牛顿二次插值法获得电压暂降幅值解析式 $U(p)$ 以及故障电压方程 $U_{th}=ap^2+bp+c$; $L_i=2$ 时,改用 $(0, U_F)$ 、 (p_{max}, U_{max}) 和 $(1, U_T)$ 3点作为牛顿二次插值法的插值点,求取电压暂降幅值解析式和故障电压方程。然后将上述故障电压方程的根 p_{ia} 作为正割迭代法的初始迭代值,通过迭代求得精确的临界点位置。基于正割迭代法的临界故障距离迭代表达式如下:

$$p_{k+1} = p_k - \frac{(U(p_k) - U_{th})(p_k - p_{k-1})}{U(p_k) - U(p_{k-1})}, \quad (16)$$

其收敛条件为

$$|U(p_{k+1}) - U_{th}| < \varepsilon. \quad (17)$$

正割迭代法是一种逼近准确根的算法,且其不需要计算敏感负荷电压暂降幅值方程的微分,因此比牛顿迭代法更加高效。此外,在实际计算过程中,存在线路临界点计算难以收敛的情况,故本文将故障点法作为补充算法,以计算有求解困难线路的临界点。

4) 识别出暂降域。重复步骤1~3,直到完成配电网中所有线路的遍历和迭代,就可得到给定网络参数和敏感负荷阈值时的电压暂降域。

4 算例分析

4.1 系统模型分析

为检验上述电压暂降域刻画算法的有效性,以IEEE30节点标准测试系统进行仿真验证。该系统由6台发电机组、30条母线、37条输电线路以及4台变压器组成,设置母线20和母线29为敏感负荷接入点,敏感负荷电压暂降阈值 U_{th} 为0.743p.u.。通过本文所提算法,确定各种短路故障情况下3条母线的电压暂降域。限于篇幅,此处仅列出单相接地短路(A

相接地)与三相短路时,敏感负荷对应的所有临界点

和电压暂降域,分别如图6与图7所示。

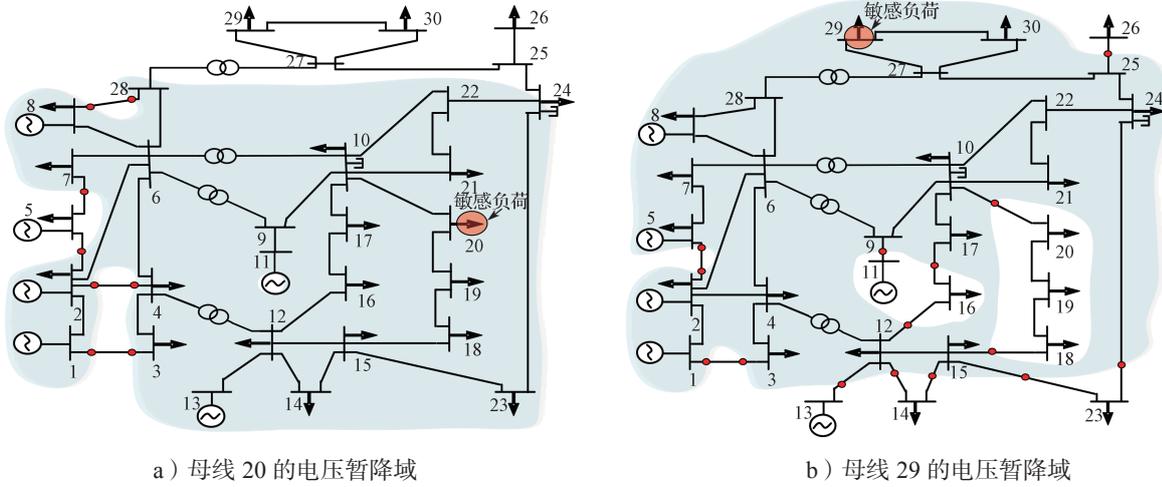


图6 单相接地短路时敏感负荷电压暂降域分布

Fig. 6 Voltage sag domain distribution of the sensitive loads under SLGF

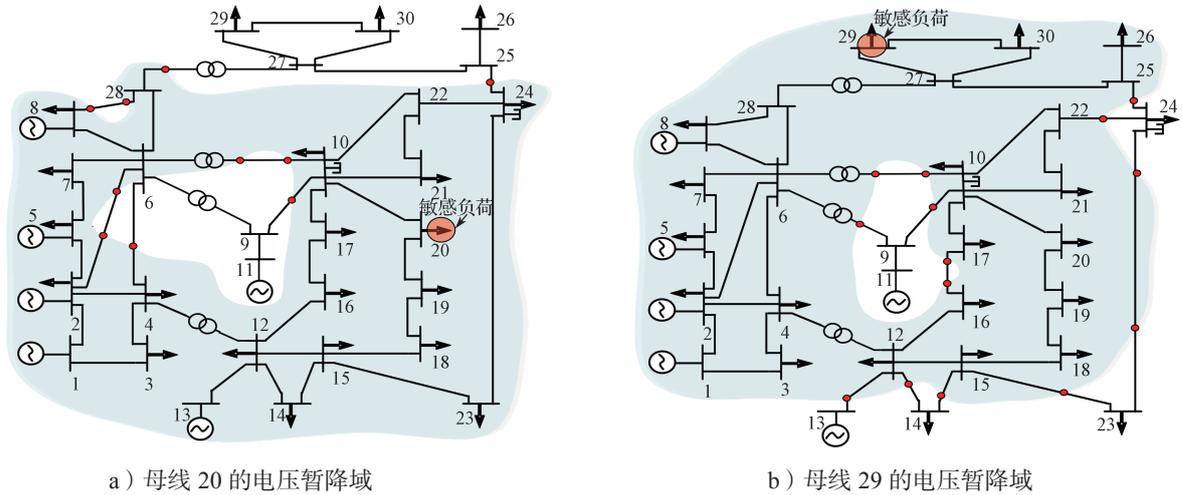


图7 三相短路时敏感负荷电压暂降域分布

Fig. 7 Voltage sag domain distribution of the sensitive loads under 3LGF

4.2 提高暂降域识别的精确度

为进一步验证上述算法识别暂降域的准确性,分别采用故障点法、传统插值法和本文所述算法求解节点20在电压暂降阈值为0.743p.u.时的暂降域。关

于故障点法,所采用的计算精度为0.1%,即对每条线路均匀设置1000个故障点。为了更直观地比较各算法的性能,下面将部分线路(含有临界点的线路)的暂降域采用数值区间的形式展现,结果如表1所示。

表1 本文算法与故障点法、传统插值方法的部分计算结果对比

Table 1 Calculation result comparison of the proposed algorithm with the fault point method and traditional interpolation method

首端	末端	故障点法		传统插值方法		本文算法	
		区间1	区间2	区间1	区间2	区间1	区间2
1	3	[0, 0.306]	[0.523, 1]	[0, 0.301]	[0.528, 1]	[0, 0.307]	[0.524, 1]
2	4	[0, 0.307]	[0.421, 1]	—	—	[0, 0.306]	[0.423, 1]
2	5	[0, 0.216]	—	[0, 0.213]	—	[0, 0.216]	—
5	7	[0.866, 1]	—	[0.873, 1]	—	[0.868, 1]	—
8	28	[0, 0.207]	[0.795, 1]	[0, 0.205]	[0.798, 1]	[0, 0.208]	[0.795, 1]

由于本文设置故障点的方式,使用故障点法搜索临界点可将误差完全控制在0.1%以下,因此将故

障点法的搜索结果作为评定算法计算准确性的标准。通过对比,发现在同等条件下,本文算法所得结果更

接近故障点法的计算结果, 因此本文算法计算临界点时的精确度更高。特别是当遍历到 2-4 线路时, 传统插值方法无法正确识别线路上的临界点, 针对这种情况, 本算法进行了优化, 具体优化过程如下:

首先, 计算出母线 2 和母线 4 上发生单相接地短路时, 敏感负荷所在母线 20 上的暂降幅值 $U_{s,2}^f$ 和 $U_{s,4}^f$, 分别为 0.617p.u. 和 0.468p.u., 均小于敏感负荷的暂降阈值 U_{th} , 所以 B_2 和 B_4 均取值 1, 线路 2-4 的线路关联向量 L 为 2, 表示母线 2 和母线 4 均在暂降域内, 因此需要进一步根据牛顿二次插值曲线判断线路 2-4 上临界点的分布情况。在传统插值方法的算法中, 所有线路均使用 $p=0$ 、 $p=0.5$ 和 $p=1$ 的 3 点数据作为牛顿二次插值法的插值点, 当线路 2-4 上发生单相接地短路时, 敏感负荷所在母线 20 上的暂降曲线如图 8 所示。

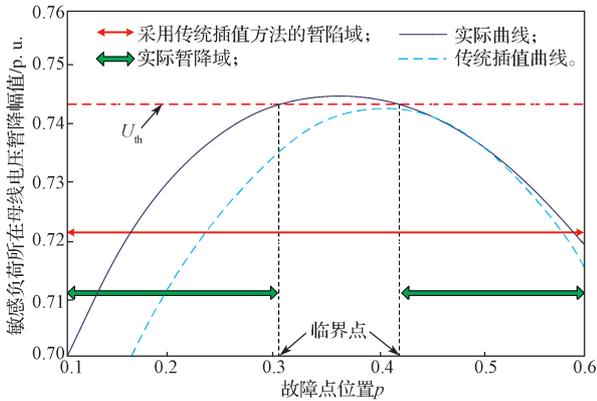


图 8 线路 2-4 的传统方法插值曲线与实际曲线对比

Fig. 8 Comparison of traditional methods and the actual sag amplitude curves for line 2-4

如图 8 所示, 尽管线路上实际存在两个临界点, 但使用传统插值方法拟合的二次插值曲线无法识别线路上的临界点, 其原因是传统插值曲线的最大幅值低于实际曲线的, 从而误将整条线路计入暂降域内。本文对于此种情况, 首先通过黄金分割搜索法得到敏感负荷所在母线 20 处的电压暂降幅值最大值点的坐标 (0.359, 0.745), 即当 $p_{max}=0.359$ 时, 取 $U_{max}=0.745p.u.$; 然后使用 (0, 0.617)、(0.359, 0.745) 和 (1, 0.468) 3 点进行二次插值, 得到新的电压暂降曲线, 曲线经过了实际暂降幅值曲线的最大值点, 如图 9 所示。

由图 9 可以得知, 该方法可为正割迭代法求取临界点提供更合适的初始迭代值。通过迭代, 得出临界点 p_1 和 p_2 分别为 0.306 和 0.423。因此, 线路 2-4 在暂降域内的两部分被准确地确定为 $[0, 0.306]$ 和 $[0.423, 1]$ 。若使用传统插值法, 会误将约 11.5% 的线路长度计入暂降域。

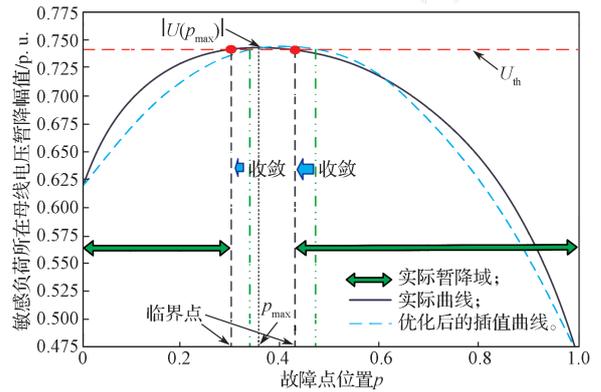


图 9 线路 2-4 本文算法插值曲线与实际曲线对比

Fig. 9 Comparison of the proposed method with the actual sag amplitude curves for line 2-4

4.3 提高暂降域识别的计算速度

3 种算法的性能对比见表 2, 可知在识别同一工况下标准测试系统的暂降域时, 使用故障点法 (达到 0.1% 精度) 识别出暂降域需 8.50 s, 使用传统插值方法需 3.62 s, 使用本文所提算法则只需 1.18 s。

表 2 3 种算法的性能对比

Table 2 Performance comparison of the algorithms

性能	故障点法	传统插值方法	本文算法
耗时/s	8.50	3.62	1.18
收敛性	—	较好	好

使用基于传统插值法的暂降域识别算法的确相比于故障点法有所提高, 但是由于传统算法对每条线路均采用先插值后迭代求得临界点的方式, 从而使得求取过程中可能出现一些试探性的工作, 并且难以避免迭代不收敛或者出现根值无意义的情况。而本文所提算法在临界点计算前, 引入判定向量和判定规则对线路进行分类, 以提前确定各临界点的大致分布, 从而系统地计算各临界点位置, 达到降低算法整体复杂度的目的。此外, 本文在最后使用故障点法作为算法补充, 可以有效搜索出迭代不收敛、有求解困难线路上的临界点, 虽然有可能对计算速度有轻微的影响, 但是保证了算法的广泛适用性。

5 结语

本文提出了一种基于黄金分割搜索的电压暂降域快速识别方法, 并通过实验验证其计算精度和算法收敛速度, 该方法相对于传统方法存在以下优点:

1) 将临界点的求解简化为二次解析式与敏感负荷电压暂降阈值的交点问题, 使得其具有明确的几何意义, 在此基础上引入多种计算方法系统性求解, 避免对每条线路使用同种方法而导致的算法低效问题,

大幅度提升了算法性能。

2) 通过引入判定向量及判定规则, 能更高效地确定各线路临界点分布情况, 减少了重复性计算, 一旦求得插值方程及拟合曲线, 利用正割迭代法就可快速计算出线路临界点, 并使用故障点法作为补充算法, 用以计算有求解困难的线路, 从而能适应大型复杂电力系统的临界点计算与暂降域识别的需要。

参考文献:

- [1] 汪颖, 王曼, 陈韵竹, 等. 基于多维关联信息的电压暂降治理需求识别[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4391-4402.
WANG Ying, WANG Man, CHEN Yunzhu, et al. Identify the Mitigation Demand Against Voltage Sag Based on Multidimensional Related Information[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4391-4402.
- [2] 何英杰, 支文浩, 张义坤, 等. 典型敏感设备电压暂降耐受能力自动测试系统研究[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1956-1964.
HE Yingjie, ZHI Wenhao, ZHANG Yikun, et al. Research on Automatic Test System for Voltage Sag Tolerance of Typical Sensitive Equipment[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1956-1964.
- [3] 吴凡, 赵晋泉, 朱斌, 等. 基于MOPSO的含分布式光伏配电网故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 46-53.
WU Fan, ZHAO Jinquan, ZHU Bin, et al. Faulty Section Location Based on MOPSO for Distribution Networks with Distributed Photovoltaic Generation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 46-53.
- [4] 金卓勃, 向铁元, 陈红坤, 等. 考虑电能质量问题的分布式光伏发电接入规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 1-8.
JIN Zhuoqing, XIANG Tiejuan, CHEN Hongkun, et al. Planning Method of Distributed Photovoltaic Power Generation Considering Power Quality[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 1-8.
- [5] LI Z M, LI W W, PAN T H. An Optimized Compensation Strategy of DVR for Micro-Grid Voltage Sag[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8.
- [6] 刘旭娜, 肖先勇, 汪颖. 电压暂降严重程度及其测度、不确定性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 644-658.
LIU Xuna, XIAO Xianyong, WANG Ying. Voltage Sag Severity and Its Measure and Uncertainty Evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 644-658.
- [7] 刘旭娜, 肖先勇, 徐方维, 等. 敏感设备电压暂降严重程度可信性评价测度与方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 190-196.
LIU Xuna, XIAO Xianyong, XU Fangwei, et al. Credibility Measure and Assessment Method of Sensitive Equipment Voltage Sag Severity[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 190-196.
- [8] 吕伟, 田立军. 基于凹陷域分析的电压暂降监测点优化配置[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 45-50.
LÜ Wei, TIAN Lijun. Optimal Allocation of Voltage Sag Monitoring Based on Exposed Area Analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 45-50.
- [9] BOLLEN M H J. Method of Critical Distances for Stochastic Assessment of Voltage Sags[J]. IEEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(1): 70-76.
- [10] 陈铁敏, 杨洪耕. 基于改进故障点法的电压凹陷评估[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(6): 66-69, 73.
CHEN Tiemin, YANG Honggeng. Assessment of Voltage Sag Based on Improved Fault Positions Method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(6): 66-69, 73.
- [11] 常学飞, 田立军, 秦英林. 一种精确确定电压暂降凹陷域的算法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 64-68.
CHANG Xuefei, TIAN Lijun, QIN Yinglin. Method to Accurately Determine Vulnerable Areas of Voltage Sag[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 64-68.
- [12] 冯澎湃, 肖楚鹏, 郭松, 等. 考虑含多敏感负荷的配电网电压暂降脆弱区域辨识方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 36-44.
FENG Pengpai, XIAO Chupeng, GUO Song, et al. Voltage Sag Vulnerable Area Identification of a Distribution Grid with Multiple Sensitive Loads[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 36-44.
- [13] LIM Y S, STRBAC G. Analytical Approach to Probabilistic Prediction of Voltage Sags on Transmission Networks[J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(1): 7.
- [14] GOSWAMI A K, GUPTA C P, SINGH G K. An Analytical Approach for Assessment of Voltage Sags[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2009, 31(7/8): 418-426.

(责任编辑: 廖友媛)