DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.03.018

基于最小幅值搜索的电压暂降监测点优化配置

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：为实现全网任意位置电压暂降可观测，提出一种基于最小幅值搜索的电压暂降监测点优化配置方法。首先根据电压暂降幅值解析式，利用黄金分割法搜索故障位置在各线路变化时节点的最小暂降幅值；进而根据电压阈值确立可观测域，构建出计及各种短路故障情形的最恶劣可观测矩阵。最后以系统内监测点数目最少为目标，全网任意位置电压暂降可观测为约束，建立电压暂降监测点优化配置模型。在构造电压暂降可观测矩阵的计算中，考虑了系统最恶劣电压暂降情形，避免了监测盲区。并且通过对 IEEE 30 节点系统的仿真计算证明了该方法的有效性。

关键词：电压暂降；优化配置；最小暂降幅值；黄金分割
中图分类号：TM72　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2096-3203(2019)03-0121-06

0　引言

电压暂降是指供电电压有效值在短时间内下降至额定值的 90%～10%，持续时间为 0.5～30 个周波的电能质量事件[1—2]。现代电力系统中大量敏感设备的投入对电能质量提出了越来越高的要求，由电压暂降导致的生产经济损失也日益严重，电压暂降逐渐成为电能质量中最受关注的问题[3—4]。实时监测系统中的电压暂降，可以有效分析电压暂降对敏感用户的影响，为建立一个完善、可靠的电压暂降防治系统提供指导[5]。然而，电力系统是一个日益庞大的复杂系统，在每个节点设置监测装置将产生巨大成本，同时，大量的监测冗余数据增加了信息处理与传输的难度。因此，优化配置全网的电压暂降监测点，以最小成本实现电压暂降全可观测，具有重要意义。

现有的电压暂降监测点优化配置方法主要为可观测域法[6—7]（monitor reach area，MRA），包括故障点型和线路分段型。故障点型 MRA 法通过计算系统内若干故障点的电压暂降特征形成可观测矩阵[8—11]。由于利用线路上离散点的暂降特征反映在该线路上其他位置故障时节点的暂降特征，该方法无法确保系统内电压暂降全可观测，得出的优化配置方案势必会出现监测盲区。线路分段型 MRA 法根据电压暂降解析式计算临界故障点，将线路划分为具有相似暂降特征的若干段，由此形成覆盖全网的可观测矩阵[12—14]，其线路分段的依据是电压阈值与暂降幅值的交点存在性。该方法的监测精度依赖于临界故障点的计算。临界故障点的计算方程为故障位置的高阶函数[15—16]，现有方法通过选取若干点进行电压暂降幅值曲线拟合，拟合精度影响着临界点的计算精度，因此，不能完全避免监测盲区。

文中基于解析法原理，建立电压暂降特征方程；继而根据不同故障类型下电压暂降幅值关于故障位置的函数，利用黄金分割法搜索故障位置变化时各节点的最小暂降幅值。通过计算不同故障类型下的电压暂降特征，得到系统的最恶劣电压暂降可观测矩阵。由于考虑监测点的最恶劣电压暂降特征，文中所提方法有效地减少了监测盲区，同时仅需对每条线路进行一次计算，提高了配置效率。通过对 IEEE 30 节点系统的仿真，验证了文中方法的正确性和有效性。

收稿日期：2019-01-11；修回日期：2019-02-25
基金项目：中国南方电网有限责任公司科技项目（GDKJXM-20180103）

1　电压暂降特征计算

图 1 为具有 N 个节点，具有复杂拓扑结构的电力系统。假设线路 f—t 上点 k 发生故障，m 为待求节点，用故障点 k 到节点 f 的归一化距离表示故障位置 p，确定方式如式(1)所示。

$$p = L_{fk}/L_{ft} \tag{1}$$

式中：L_{fk} 为节点 f 至故障点 k 的线路长度，L_{ft} 为线路 f—t 的长度。为方便计算作以下假设：(1) 系统内接地短路故障均为金属性故障；(2) 不考虑电压暂降的暂态过程，即认为故障瞬间电压降至最低。

根据文献[17]，节点 m 与故障点 k 的互阻抗 Z_{mk}，故障点 k 的自阻抗 Z_{kk} 分别定义为：

$$Z_{mk,s} = Z_{mf,s} + (Z_{mt,s} - Z_{mf,s})p \tag{2}$$

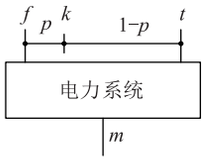


图 1 系统结构

Fig.1 Structure of power system

$$Z_{kk,s}=(Z_{ff,s}+Z_{tt,s}-2Z_{ft,s}-z_{ft,s})p^2+[z_{ft,s}-2(Z_{ff,s}-Z_{ft,s})]p+Z_{ff,s} \tag{3}$$

式中：$s=0$，1，2 为零序、正序和负序；$Z_{mf,s}$，$Z_{mt,s}$ 分别为节点 m 和节点 f、节点 t 之间的互阻抗；$Z_{ff,s}$ 和 $Z_{tt,s}$ 为节点 f 和节点 t 的自阻抗；$z_{ft,s}$ 为线路 f—t 的线路阻抗。故障点 k 的故障前电压定义为：

$$U_k^{\mathrm{pre}}=U_f^{\mathrm{pre}}+(U_t^{\mathrm{pre}}-U_f^{\mathrm{pre}})p \tag{4}$$

式中：U_f^{pre} 和 U_t^{pre} 分别为节点 f 和节点 t 的故障前电压。忽略故障电阻，旋转因子 $a=\mathrm{e}^{\mathrm{j}120^\circ}$，$k$ 处发生短路故障，运用对称分量法分别推导各故障情况下，系统中任意节点 m 的三相电压暂降幅值。

（1）单相接地故障（SLGF）。

$$\begin{cases}U_{m,\mathrm{A}}^{\mathrm{f}}=U_{m,\mathrm{A}}^{\mathrm{pre}}-\dfrac{Z_{mk,1}+Z_{mk,2}+Z_{mk,0}}{Z_{kk,1}+Z_{kk,2}+Z_{kk,0}}U_k^{\mathrm{pre}}\\ U_{m,\mathrm{B}}^{\mathrm{f}}=U_{m,\mathrm{B}}^{\mathrm{pre}}-\dfrac{a^2Z_{mk,1}+aZ_{mk,2}+Z_{mk,0}}{Z_{kk,1}+Z_{kk,2}+Z_{kk,0}}U_k^{\mathrm{pre}}\\ U_{m,\mathrm{C}}^{\mathrm{f}}=U_{m,\mathrm{C}}^{\mathrm{pre}}-\dfrac{aZ_{mk,1}+a^2Z_{mk,2}+Z_{mk,0}}{Z_{kk,1}+Z_{kk,2}+Z_{kk,0}}U_k^{\mathrm{pre}}\end{cases} \tag{5}$$

（2）两相相间短路（LLF）。

$$\begin{cases}U_{m,\mathrm{A}}^{\mathrm{f}}=U_{m,\mathrm{A}}^{\mathrm{pre}}-\dfrac{Z_{mk,1}-Z_{mk,2}}{Z_{kk,1}+Z_{kk,2}}U_k^{\mathrm{pre}}\\ U_{m,\mathrm{B}}^{\mathrm{f}}=U_{m,\mathrm{B}}^{\mathrm{pre}}-\dfrac{a^2Z_{mk,1}-aZ_{mk,2}}{Z_{kk,1}+Z_{kk,2}}U_k^{\mathrm{pre}}\\ U_{m,\mathrm{C}}^{\mathrm{f}}=U_{m,\mathrm{C}}^{\mathrm{pre}}-\dfrac{aZ_{mk,1}-a^2Z_{mk,2}}{Z_{kk,1}+Z_{kk,2}}U_k^{\mathrm{pre}}\end{cases} \tag{6}$$

（3）两相接地短路（DLGF）。

$$\begin{cases}U_{m,\mathrm{A}}^{\mathrm{f}}=U_{m,\mathrm{A}}^{\mathrm{pre}}-\dfrac{(Z_{mk,1}-Z_{mk,2})Z_{kk,0}+(Z_{mk,1}-Z_{mk,0})Z_{kk,2}}{Z_{kk,1}Z_{kk,2}+Z_{kk,1}Z_{kk,0}+Z_{kk,2}Z_{kk,0}}U_k^{\mathrm{pre}}\\ U_{m,\mathrm{B}}^{\mathrm{f}}=U_{m,\mathrm{B}}^{\mathrm{pre}}-\dfrac{(a^2Z_{mk,1}-aZ_{mk,2})Z_{kk,0}+(a^2Z_{mk,1}-Z_{mk,0})Z_{kk,2}}{Z_{kk,1}Z_{kk,2}+Z_{kk,1}Z_{kk,0}+Z_{kk,2}Z_{kk,0}}U_k^{\mathrm{pre}}\\ U_{m,\mathrm{C}}^{\mathrm{f}}=U_{m,\mathrm{C}}^{\mathrm{pre}}-\dfrac{(aZ_{mk,1}-a^2Z_{mk,2})Z_{kk,0}+(aZ_{mk,1}-Z_{mk,0})Z_{kk,2}}{Z_{kk,1}Z_{kk,2}+Z_{kk,1}Z_{kk,0}+Z_{kk,2}Z_{kk,0}}U_k^{\mathrm{pre}}\end{cases} \tag{7}$$

（4）三相短路故障（TPF）。

$$U_{m,\mathrm{A}}^{\mathrm{f}}=U_{m,\mathrm{B}}^{\mathrm{f}}=U_{m,\mathrm{C}}^{\mathrm{f}}=U_m^{\mathrm{pre}}-\frac{Z_{mk,1}}{Z_{kk,1}}U_k^{\mathrm{pre}} \tag{8}$$

式中：$U_{m,\mathrm{A}}^{\mathrm{pre}}$，$U_{m,\mathrm{B}}^{\mathrm{pre}}$，$U_{m,\mathrm{C}}^{\mathrm{pre}}$ 分别代表节点 m 的 ABC 相故障前电压；$U_{m,\mathrm{A}}^{\mathrm{f}}$，$U_{m,\mathrm{B}}^{\mathrm{f}}$，$U_{m,\mathrm{C}}^{\mathrm{f}}$ 分别代表节点 m 的 ABC 相故障时电压。假设负荷电压阈值为 U_{th}，$U^{\mathrm{f}}(p)$ 为监测点电压关于故障位置的函数，可观性计算可等效为电压阈值与监测点电压幅值的交点存在性问题，即：

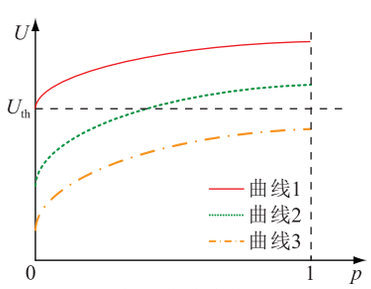
$$|U_{\mathrm{th}}|^2=|U^{\mathrm{f}}(p)|^2 \tag{9}$$

根据式（2）—式（8），对于接地短路故障，式（9）为故障位置的 6 阶方程；对于相间短路故障，式（9）为故障位置的 10 阶方程，其精确求解十分复杂[18]。从而根据电压暂降特征计算式，即可得到任意位置故障时，系统内各节点的暂降特征，即文中提出的最恶劣可观测矩阵的构建基础。

2 电压暂降可观测矩阵

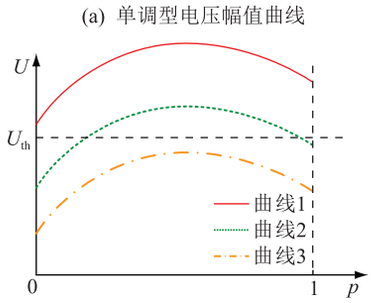
2.1 电压暂降可观测性

可观测域是指系统发生短路故障并引起某一监测点发生电压暂降时，该点所能监测到的故障点所在区域。根据系统拓扑特征，故障位置在线路变化时，电压幅值曲线可以分为单调型、凹型和凸型曲线 3 类，如图 2（a）—（c）所示[18]。其中，典型电压曲线 1 表示故障位置在线路移动时，监测点的电压幅值恒大于阈值，该线路全段在可观测域外；电压曲线 2 表示该线路存在临界故障点，低于阈值的部分线路在可观测域内；电压曲线 3 表示监测点的电压幅值恒小于电压阈值，该线路全段在可观测域内。



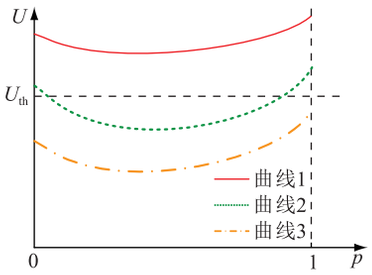
归一化故障位置

(a) 单调型电压幅值曲线



归一化故障位置

(b) 凸型电压幅值曲线



(c) 凹型电压幅值曲线

图 2 典型电压暂降幅值曲线

Fig.2 Typical sag magnitude curve

对于典型电压幅值曲线 1 和曲线 3,线路上任意故障位置导致的监测点电压暂降特征具有相似性,任意位置故障时的监测点可观测性均可以反映线路全段的可观测性;对于典型电压幅值曲线 2,线路全段的可观测性则依赖于临界故障点计算的准确性,可根据图 3 进行说明。

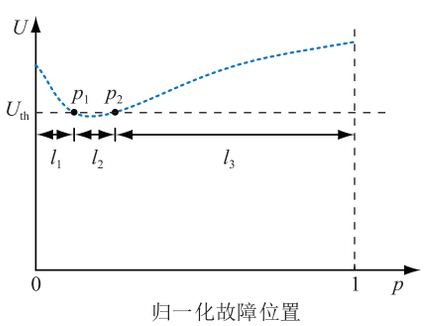


图 3 第 2 类典型电压暂降幅值曲线

Fig.3 The second kind of typical sag magnitude curve

考虑图 3 所示第 2 类典型电压暂降幅值曲线,对于故障点型 MRA 法,若典型故障点选取不合适,仅选取位于 0~p_1 和 p_2~1 区间的故障点可观测矩阵,则忽略了故障点位于 p_1~p_2 区间时的监测需求,导致 p_1~p_2 区间成为监测盲区;对于线路分段型 MRA 法,其监测精度依赖于线路分段的准确性,现有方法一般通过拟合电压曲线计算临界点进行线路分段。对于图 3 所示曲线,若拟合结果不够准确,使得计算所得的某一临界点大于 p_1 或小于 p_2,则临界点间线路不能完全覆盖 l_2,从而产生监测盲区。

2.2 最恶劣可观测矩阵

由 2.1 节可知通过离散电压暂降特征建立可观测域进行监测点优化配置的方法不能确保系统内任意位置电压暂降全可观测。文中提出的基于最小幅值搜索的监测点优化配置方法,将临界故障点的计算问题转化为最恶劣电压暂降下电压幅值与阈值的大小判断问题,能够克服现有 MRA 法对电压暂降全可观性描述不足的缺点。

对于图 1 所示系统,依次计算故障点在故障线路移动时,各节点的最小暂降幅值,构建的电压暂降幅值矩阵如下。

$$\boldsymbol{U}_T^{\mathrm{f}}=\begin{bmatrix} U_{11}^{\mathrm{f}} & U_{12}^{\mathrm{f}} & \cdots & U_{1L}^{\mathrm{f}} \\ U_{21}^{\mathrm{f}} & U_{22}^{\mathrm{f}} & \cdots & U_{2L}^{\mathrm{f}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ U_{N1}^{\mathrm{f}} & U_{N2}^{\mathrm{f}} & \cdots & U_{NL}^{\mathrm{f}} \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中:L 为系统内线路总数;T 取 1~4 分别表示 SLGF、LLF、DLGF 和 TPF;$\boldsymbol{U}_T^{\mathrm{f}}$ 代表系统的 $N\times L$ 维最小电压暂降幅值矩阵,矩阵中任意元素 U_{ij}^{f} 表示故障位置在线路 j 变化时,节点 i 的最小电压暂降幅值。与离散型故障电压矩阵不同,U_{ij}^{f} 不再是某一故障点或某段故障线路的离散暂降特征,而是以节点最恶劣的暂降特征反应的随着故障位置变化而连续变化的特征值。设 b_{ij} 为:

$$b_{ij}=\begin{cases}1 & U_{ij}^{\mathrm{f}}\leqslant U_{\mathrm{th}} \\ 0 & U_{ij}^{\mathrm{f}}>U_{\mathrm{th}}\end{cases}$$

$$i\in\{1,2,\cdots,N\}\quad j\in\{1,2,\cdots,L\} \tag{11}$$

则在故障类型 T 下,系统的最恶劣可观测矩阵 $\boldsymbol{B}_T$ 可表示为:

$$\boldsymbol{B}_T=\begin{bmatrix} b_{11,T} & b_{12,T} & \cdots & b_{1L,T} \\ b_{21,T} & b_{22,T} & \cdots & b_{2L,T} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{N1,T} & b_{N2,T} & \cdots & b_{NL,T} \end{bmatrix} \tag{12}$$

分别计算各故障类型下的可观测矩阵,并计算其并集,则可得到系统的全局最恶劣可观测矩阵 $\boldsymbol{D}$:

$$\boldsymbol{D}=\boldsymbol{B}_1\cup\boldsymbol{B}_2\cup\boldsymbol{B}_3\cup\boldsymbol{B}_4 \tag{13}$$

当线路 j 发生故障时,若敏感负荷节点 i 在某故障类型下的最小暂降幅值低于电压阈值,则 $\boldsymbol{D}$ 中元素 d_{ij} 取 1,反之取 0。

3 基于最小暂降幅值的监测点优化配置

3.1 应用黄金分割的最小暂降幅值搜索

电压暂降幅值解析式是关于故障位置的单峰函数。黄金分割法是一种能快速搜索极值的一维优选算法,通过比较目标函数缩小搜索区间从而逼近极值。根据黄金分割法搜索最小暂降幅值的步骤如下,其搜索流程如图 4 所示。

(1) 确定搜索初值 p_1,p_2,给定搜索误差限 e,根据式(14)计算迭代值。

$$\begin{cases}p_{\mathrm{a}}=p_2-0.618(p_2-p_1)\\ p_{\mathrm{b}}=p_1+0.618(p_2-p_1)\end{cases} \tag{14}$$

(2) 计算 p_{a} 和 p_{b} 处的暂降幅值 $U^{\mathrm{f}}(p_{\mathrm{a}})$ 和 $U^{\mathrm{f}}(p_{\mathrm{b}})$,若 $U^{\mathrm{f}}(p_{\mathrm{a}})$ 小于 $U^{\mathrm{f}}(p_{\mathrm{b}})$,则最小值位于[$p_1$,$p_{\mathrm{b}}$]

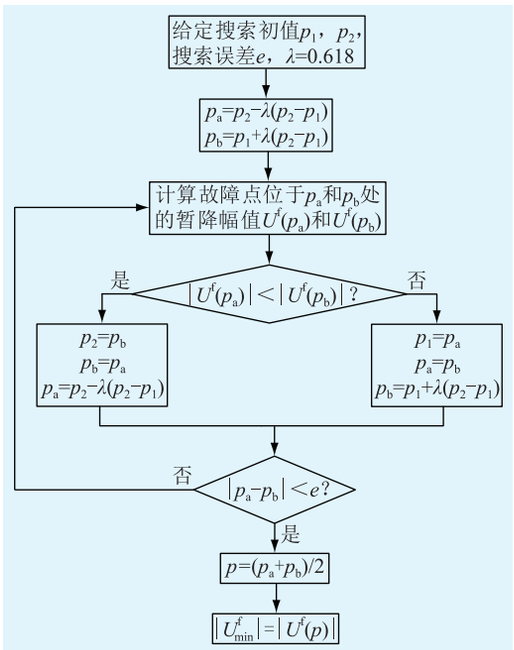


图 4　最小暂降幅值搜索流程

Fig.4　Procedure for golden section search

内，令 $p_2=p_b$；反之，则最小值位于$[p_a, p_2]$内，令 $p_1=p_a$。

（3）判断 $|p_a-p_b|$ 在搜索误差限内，若是，则对应的最小暂降幅值为 $U^f((p_a+p_b)/2)$，搜索结束。否则转步骤（1）。

3.2　监测点优化配置模型

对于一个含 L 条线路的 N 节点系统，根据式（13）构建 $N\times L$ 维最恶劣可观测矩阵，并用一个 N 维 0-1 决策向量 $\boldsymbol{X}$ 表示每个节点处是否需要安装电压暂降监测装置：

$$\boldsymbol{X}=[x_1,x_2,\cdots,x_{N-1},x_N] \tag{15}$$

式中：x_i取 1 表示在节点 i 处安装监测装置，反之取 0。决策向量 $\boldsymbol{X}$ 与最恶劣可观测矩阵 $\boldsymbol{D}$ 的乘积是一个 L 维向量，于是，电压暂降监测点最优配置模型的目标函数和约束条件如式（16）所示。

$$\min f=\sum_{i=1}^{N}x_i \tag{16}$$

$$\text{s.t.}\quad \boldsymbol{X}\times\boldsymbol{D}\geqslant\boldsymbol{A} \tag{17}$$

式中：$\boldsymbol{A}$ 为 L 维向量，其中任意元素 a_j表示线路 j 引发的电压暂降可以被安装在监测节点的全部监测装置所监测的次数。要保证系统内各位置的电压暂降均至少被一个监测点准确记录，则 $a_j\geqslant 1$。

4　算例分析

文中应用 IEEE 30 节点系统进行仿真实验，该系统包括 30 个节点，37 条线路，如图 5 所示。

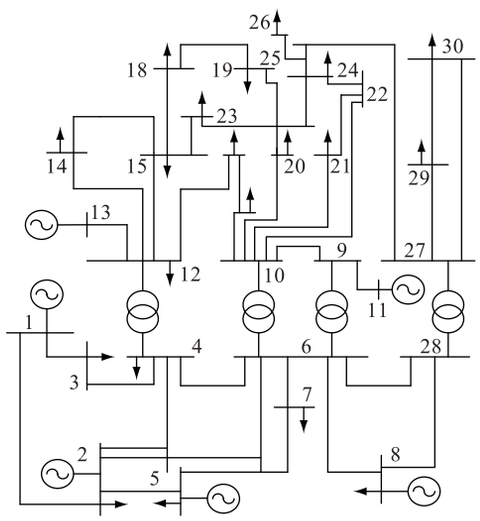


图 5　IEEE 30 节点系统

Fig.5　IEEE 30-bus system

4.1　优化配置方案

分别取电压阈值为 0.7 p.u.，0.8 p.u.，0.9 p.u.，将文中所提方法的计算结果与文献[8]的故障点型 MRA 法和文献[14]中线路分段型 MRA 法的计算结果进行对比，对比结果如表 1 所示。

表 1　不同方法优化配置结果

Table 1　Results of sag monitor placement for different methods

电压阈值/p.u.	方法	配置数目	监测点位置
0.9	故障点 MRA	4	3,7,15,30
	分段 MRA	2	7,30
	文中	4	7,21,25,30
0.8	故障点 MRA	7	3,7,10,15,17,19,25
	分段 MRA	5	2,4,5,17,30
	文中	5	2,5,6,17,20
0.7	故障点 MRA	8	2,3,7,10,15,17,19,25
	分段 MRA	12	2,3,4,5,6,7,9,15,20,26,28,30
	文中	11	2,3,7,9,10,17,19,20,21,25,30

根据电压暂降可观测域原理，监测点对幅值较小的电压暂降监测能力有限，随着电压阈值的降低，所需监测点数目明显增多。与故障点型 MRA 法相比，文中在阈值为 0.8 p.u.和 0.9 p.u.时，均以较少的监测点数实现了任意位置故障时，全网电压暂降的可观测，减少了监测盲区。与线路分段法相比，在阈值为 0.9 p.u.时，文中方法只比该法多安装 2 台监测装置；在阈值为 0.8 p.u.时，所需监测点数目相同，在阈值 0.7 p.u.时，所需监测点较线路分段法少 1 台，所需的监测点数随着电压阈值的降低逐

渐优于线路分段型 MRA 法。

随着电压阈值的降低,离散型可观测矩阵维数也随着凹陷域的增大而更加复杂,模型中增加了较多的冗余信息,导致所需的监测点数目增长较快。而文中所提方法考虑了系统最恶劣的电压暂降情形,所建立模型不受冗余信息的影响。随着凹陷域的增大,所需的监测点数逐渐少于故障点 MRA 法和线路分段法,且具有更强的适应能力。表 2 为不同阈值下的配置总时间,由于无需计算临界故障点且减少了可观测矩阵维度,文中方法所用时间与文献相比平均减少了 77%,提高了计算效率。

表 2 不同方法优化配置时间

Table 2 Time of optimal placement for different methods

电压阈值/p.u.	配置时间/s	
	分段 MRA	文中方法
0.9	9.761 0	2.340 8
0.8	9.469 2	2.148 3
0.7	9.223 5	2.017 1

4.2 冗余度

通常各个监测点的监测范围有很大重叠,即某处的电压暂降信息可能被多个监测装置获取,称为信息冗余。文献[19]定义监测信息的平均冗余度(mean redundancy, MR)为任意位置故障时,导致的电压暂降平均能同时被 R 个监测点监测到,即:

$$R = \sum_{i=1}^{N} D_{\text{monitor}} / N \tag{17}$$

式中:D_{monitor}代表优化配置方案中监测点的监测范围。根据文中所提方法,电压阈值分别取 0.9 p.u., 0.8 p.u.,0.7 p.u.时,优化配置方案监测数据的平均冗余度分别为 2.933,3.667,5.367。

根据计算结果,配置方案的监测信息平均冗余度随着电压阈值的降低而增加。由可观测域的定义可知,电压阈值越低,各监测点的监测范围也就越小,导致各监测点间监测信息的平均冗余度降低。但监测范围减小,必然需要增加监测点以确保系统中任意位置的电压暂降可观测性,导致系统内总的平均冗余度有所增加,相应的配置成本也有所提高。一般而言,根据优化模型得到监测点配置方案不唯一,合理的监测冗余度有利于电压暂降特征信息的更精确获取与故障定位,实际系统中可综合考虑各节点的电压暂降耐受能力与所接负荷特征,适当增加监测配置点以提高各监测点所需的监测信息冗余,进行监测点优化配置,选择最优配置方案。

5 结语

文中提出一种基于最小幅值搜索的电压暂降监测点优化配置方法,利用黄金分割法搜索故障位置在线路上变化时监测节点的最小暂降幅值,建立各故障情况下的最恶劣可观测矩阵,对监测点进行优化配置,保证了全网任意位置电压暂降可观测。算例分析表明所得监测点配置方案不受冗余信息影响,扩大监测范围的同时增加了抗扰动能力,克服了传统方法存在监测盲区的不足。考虑负荷波动、电网运行方式变化等因素对配电网监测点配置的影响,将是下一步的研究重点。

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.
XIAO Xiangning. Power quality analysis and control[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2010.

[2] 张军, 浦天宇. 多层次电压暂降评价方法研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6):49-54.
ZHANG Jun, PU Tianyu. Multi-level evaluation method of voltage sag[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6):49-54.

[3] 张宸宇, 史明明, 范忠, 等. 电压暂降事件分类及短路类型识别研究[J]. 电力工程技术, 2018,37(2):102-107.
ZHANG Chenyu, SHI Mingming, FAN Zhong, et al. Research on voltage sag event classification and short circuit type identification[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2):102-107.

[4] 赵芳, 杜兆斌. 敏感负荷对含新能源配网规划的影响[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5):56-62.
ZHAO Fang, DU Zhaobin. Impact analysis of voltage sensitive load on planning of distribution network with new energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5):56-62.

[5] 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.

[6] 邱玉涛, 肖先勇, 熊茜, 等. 基于临界阻抗和广度优先-条件搜索的暂降监测装置优化配置[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10):138-143.
QIU Yutao, XIAO Xianyong, XIONG Qian, et al. Optimal sag monitor placement based on critical impedance and breadth first-condition search[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10):138-143.

[7] 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.
LYU Wei, TIAN Lijun. Optimal allocation of voltage sag monitoring based on exposed area analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6):45-50.

[8] 周超，田立军. 基于粒子群优化算法的电压暂降监测点优化配置[J]. 电工技术学报，2014，29(4)：181-187.
ZHOU Chao，TIAN Lijun. An optimum allocation method of voltage sag monitoring nodes based on particles swarm optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2014，29(4)：181-187.

[9] ALMEIDA C，KAGAN N. Using genetic algorithms and fuzzy programming to monitor voltage sags and swells[J]. IEEE Intelligent Systems，2011，26(2)：46-53.

[10] 唐亚迪，徐永海，洪旺松. 基于模糊控制模型的电压暂降监测装置优化配置[J]. 电力自动化设备，2015，35(8)：65-71.
TANG Yadi，XU Yonghai，HONG Wangsong. Allocation optimization based on fuzzy control model for voltage-sag monitors[J]. Electric Power Automation Equipment，2015，35(8)：65-71.

[11] 林芳，肖先勇，张逸，等. 基于暂降信息的监测装置优化配置与系统电压暂降水平评估[J]. 电力自动化设备，2016，36(5)：67-73.
LIN Fang，XIAO Xianyong，ZHANG Yi，et al. Optimal monitor allocation and system sag level assessment based on sag information[J]. Electric Power Automation Equipment，2016，36(5)：67-73.

[12] ESPINOSAJUAREZ E，HERNANDEZ A，OLGUIN G. An approach based on analytical expressions for optimal location of voltage sags monitors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2009，24(4)：2034-2042.

[13] 王东旭，乐健，刘开培，等. 基于线路分段法的电压跌落监测网络优化布点策略[J]. 电工技术学报，2011，26(10)：31-38.
WANG Dongxu，LE Jian，LIU Kaipei，et al. Optimal location strategy of voltage dip monitoring network based on line sectionalizing method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2011，26(10)：31-38.

[14] 刘景远，刘卫明，李袖，等. 一种电压暂降监测装置优化配置的方法[J]. 电测与仪表，2014，51(11)：120-124.
LIU Jingyuan，LIU Weiming，LI Xiu，et al. A method of optimal configuration for voltage sag monitoring devices[J]. Electrical Measurement & Instrumentation，2014，51(11)：120-124.

[15] 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.

[16] PARK C H，JANG G. Systematic method to identify an area of vulnerability to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2016，32(2)：1583-1591.

[17] 王东旭，乐健，刘开培，等. 基于虚拟节点的复杂电网电压跌落随机评估方法[J]. 电工技术学报，2011，26(8)：190-197.
WANG Dongxu，LE Jian，LIU Kaipei，et al. Stochastic assessment method of voltage dip in complex power grid based on virtual bus[J]. Electric Power Engineering Technology，2011，26(8)：190-197.

[18] 赵晨雪，陶顺，肖湘宁. 考虑电压暂降传播的监测点优化配置改进方法[J]. 现代电力，2016，33(3)：82-87.
ZHAO Chenxue，TAO Shun，XIAO Xiangning. An improved monitoring allocation method by considering the propagation of voltage sag[J]. Modern Electric Power，2016，33(3)：82-87.

[19] 唐琳，肖先勇，张逸，等. 电压暂降状态和水平评估模式匹配法与监测装置多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报，2015，35(13)：3264-3271.
TANG Lin，XIAO Xianyong，ZHANG Yi，et al. Voltage sag state and level assessment based on pattern matching method and multi-objective optimal monitors allocation[J]. Proceedings of the CSEE，2015，35(13)：3264-3271.

作者简介：


谢伟伦

谢伟伦(1978)，男，硕士，高级工程师，从事电能质量监测、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，从事交流调速、变结构控制和电力电子应用工作；

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相关工作。

An optimal allocation method of voltage sag monitoring nodes based on minimum magnitude search

XIE Weilun，XUE Feng，HUANG Zhiwei

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

Abstract：In order to realize the observation of voltage sag at any position in power system，an optimal allocation method of voltage sag monitoring nodes based on the minimum magnitude search is proposed. Firstly，according to the analytic formula of voltage sag，the minimum node voltage magnitude when the fault location changes in each line is searched by golden section method. Based on the voltage threshold，the monitor reach area and the worst observable matrix are constructed under different fault types. Finally，with the constraint of fully observable voltage sag at any position，the optimal allocation model is established to minimize the voltage sag monitoring nodes. When constructing the voltage sag observable matrix，the worst scenario of voltage sag is considered to avoid monitoring blind area. The accuracy and effectiveness of proposed method are verified based on IEEE 30-bus system.

Keywords：voltage sag；optimal placement；minimum sag magnitude；golden section

(编辑　方晶)