

# 考虑扰动源定位的电压暂降监测点最优配置

陈礼频<sup>1</sup>, 肖先勇<sup>2</sup>, 张文海<sup>1</sup>

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 四川大学 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘要:** 结合监测点可观测域原理和电压暂降扰动源定位法, 构建扰动源可观性矩阵, 在此基础上以监测点数最少为目标, 以全网电压暂降及其扰动源可观为约束条件, 建立监测点最优配置模型, 并用 0-1 整数线性规划方法进行求解。IEEE 30 节点测试系统的仿真结果表明, 所提方法正确有效, 所需监测点数量少, 克服了传统监测点配置方法中电压阈值选取困难的问题, 且所得电压暂降特征更精确。

**关键词:** 电压暂降; 扰动源定位; 监测; 可观性矩阵; 0-1 整数线性规划; 模型

**中图分类号:** TM 715

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.014

## 0 引言

电压暂降是系统运行过程中不可避免的短时电能质量扰动现象<sup>[1-2]</sup>。随着电力电子、微电子等技术的推广应用, 因电压暂降导致的用户抱怨和经济损失日益严重, 已引起国内外学者的广泛关注<sup>[3-7]</sup>。国际电气与电子工程师协会(IEEE)将电压暂降定义为: 电压有效值降至额定电压的 10%~90%, 持续时间为 0.5 周期到 1 min 的短时扰动现象<sup>[8]</sup>。电压暂降是供电企业和用户面临的最严重的电能质量问题之一<sup>[9]</sup>, 而在线监测是统计分析电压暂降的有效方法, 也是供电企业和用户的迫切要求。系统故障是电压暂降最主要的扰动源<sup>[10]</sup>, 本文针对系统故障引起的电压暂降, 研究监测点的优化配置方法。

现有电压暂降统计分析方法主要有随机评估法和实测统计法<sup>[11]</sup>。随机评估法通过建立随机模型评估电压暂降特征, 具有推广性和预测性。但电压暂降受故障位置、系统元件故障率、气候环境以及保护可靠性等因素影响, 具有复杂不确定性<sup>[12-14]</sup>, 而实际中通常缺乏这些影响因素的统计信息, 这直接影响着随机评估结果的准确性。实测统计法基于监测装置记录的测量数据, 能保证统计结果准确、可靠, 但实际中不可能在所有母线安装监测装置。因此, 通过优化配置监测点, 以最少监测点实现全网电压暂降可观, 具有重要的工程实用价值。

传统电压暂降监测点配置方法基于监测点可观测域 MRA(Monitor Reach Area)原理<sup>[15-18]</sup>, 根据给定

电压阈值配置监测点, 存在电压阈值选取困难和非监测点电压暂降特征信息删失等问题。以定位电压暂降扰动源为目标配置监测点, 是解决上述问题的有效途径。然而现有相关方法尚不完备: 文献[19]在一组确保全网电压暂降可观的监测点配置方案基础上, 通过增加监测冗余度, 扩大全网故障可观范围, 但该方法不能保证以最少的监测点数定位电压暂降扰动源; 文献[20]未考虑监测装置只记录幅值低于设定阈值的电压暂降事件, 而实际中监测装置由于存储空间有限, 不可能对电压一直录波。

本文首先保证全网幅值低于 0.9 p.u. 的电压暂降可观, 在此基础上充分利用暂降幅值特征信息, 基于节点阻抗矩阵定位扰动源, 建立反映各监测点组合可定位扰动源范围的扰动源可观性矩阵。用 0-1 整数线性规划方法进行监测点优化配置, 实现对全网电压暂降及其扰动源的有效观测。对 IEEE 30 节点测试系统的仿真证明了本文方法的正确性、有效性和工程应用价值。

## 1 电压暂降幅值计算模型

如图 1 所示, 假设  $m$  为被观测母线,  $\lambda$  为线路  $i-j$  上故障点  $k$  到节点  $i$  的距离。  $m$  与  $k$  之间的互阻抗和  $k$  的自阻抗分别为:

$$Z_{mk}^u = (1-\lambda)Z_{mi}^u + \lambda Z_{mj}^u \quad (1)$$

$$Z_{kk}^u = (1-\lambda)^2 Z_{ii}^u + \lambda^2 Z_{jj}^u + 2\lambda(1-\lambda)Z_{ij}^u + \lambda(1-\lambda)z_{ij}^u \quad (2)$$

其中, 上标  $u$  取值 1、2、0 表示正序、负序和零序;  $Z_{mi}^u$ 、 $Z_{mj}^u$  和  $Z_{ij}^u$  为节点间互阻抗;  $Z_{ii}^u$ 、 $Z_{jj}^u$  和  $Z_{kk}^u$  为节点自阻抗;  $z_{ij}^u$  为线路  $i-j$  的阻抗值。

设各节点故障前电压均为 1 p.u., 旋转因子  $\alpha = e^{j120^\circ}$ 。当  $k$  点发生不同类型短路故障时, 母线  $m$  的电压暂降幅值计算公式见式(3)~(6)。

三相短路故障:

$$U_m = 1 - \frac{Z_{mk}^1}{Z_{kk}^1} \quad (3)$$

收稿日期: 2013-03-07; 修回日期: 2013-12-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(CRI2012-RCPS00998NN); 国家自然科学基金资助项目(50877049); 四川省科技支撑计划项目(2010GZ0256)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(CRI2012-RCPS00998NN), the National Natural Science Foundation of China(50877049) and Science and Technology Pillar Program of Sichuan Province(2010GZ0256)

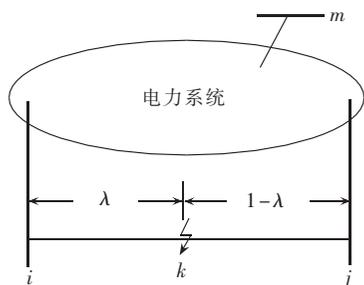


图 1 系统结构

Fig.1 Structure of power system

单相接地短路故障:

$$\begin{cases} U_{m,A} = 1 - \frac{Z_{mk}^0 + Z_{mk}^1 + Z_{mk}^2}{Z_{kk}^0 + Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2} \\ U_{m,B} = \alpha^2 - \frac{Z_{mk}^0 + \alpha^2 Z_{mk}^1 + \alpha Z_{mk}^2}{Z_{kk}^0 + Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2} \\ U_{m,C} = \alpha - \frac{Z_{mk}^0 + \alpha Z_{mk}^1 + \alpha^2 Z_{mk}^2}{Z_{kk}^0 + Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2} \end{cases} \quad (4)$$

两相短路故障:

$$\begin{cases} U_{m,A} = 1 - \frac{Z_{mk}^1 - Z_{mk}^2}{Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2} \\ U_{m,B} = \alpha^2 - \frac{\alpha^2 Z_{mk}^1 - \alpha Z_{mk}^2}{Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2} \\ U_{m,C} = \alpha - \frac{\alpha Z_{mk}^1 - \alpha^2 Z_{mk}^2}{Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2} \end{cases} \quad (5)$$

两相接地短路故障:

$$\begin{cases} U_{m,A} = 1 - \frac{(Z_{mk}^1 - Z_{mk}^0)Z_{kk}^2 + (Z_{mk}^1 - Z_{mk}^2)Z_{kk}^0}{Z_{kk}^0 Z_{kk}^1 + Z_{kk}^1 Z_{kk}^2 + Z_{kk}^2 Z_{kk}^0} \\ U_{m,B} = \alpha^2 - \frac{(\alpha^2 Z_{mk}^1 - Z_{mk}^0)Z_{kk}^2 + (\alpha^2 Z_{mk}^1 - \alpha Z_{mk}^2)Z_{kk}^0}{Z_{kk}^0 Z_{kk}^1 + Z_{kk}^1 Z_{kk}^2 + Z_{kk}^2 Z_{kk}^0} \\ U_{m,C} = \alpha - \frac{(\alpha Z_{mk}^1 - Z_{mk}^0)Z_{kk}^2 + (\alpha Z_{mk}^1 - \alpha^2 Z_{mk}^2)Z_{kk}^0}{Z_{kk}^0 Z_{kk}^1 + Z_{kk}^1 Z_{kk}^2 + Z_{kk}^2 Z_{kk}^0} \end{cases} \quad (6)$$

## 2 传统监测点配置方法及其不足

### 2.1 传统方法原理

传统监测点配置方法基于 MRA 原理,比较短路计算所得电压幅值与设定的电压阈值,设  $p$  为全网设定的故障点数(或用解析法求出的全网线路分段数)<sup>[18]</sup>, $n$  为全网母线数,则电压暂降可观性矩阵为:

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{p1} & s_{p2} & \cdots & s_{pn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$S$  中任意元素  $s_{ij}$  取值为:

$$s_{ij} = \begin{cases} 1 & U_{ij} \leq U_{th} \\ 0 & U_{ij} > U_{th} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $U_{ij}$  表示第  $i$  个故障点(或线路分段)发生短路故障时母线  $j$  的电压,不对称故障取幅值最小一相电压;  $U_{th}$  为设定的电压阈值。

定义  $n$  维监测点决策向量:

$$B = [b_1 \quad b_2 \quad \cdots \quad b_n] \quad (9)$$

$B$  中元素取值为:

$$b_j = \begin{cases} 1 & \text{将母线 } j \text{ 作为监测点} \\ 0 & \text{不将母线 } j \text{ 作为监测点} \end{cases} \quad (10)$$

为确保全网电压暂降可观,对  $S$  中任意第  $i$  行元素,  $B$  中元素均应满足不等式约束:

$$\sum_{j=1}^n s_{ij} b_j \geq 1 \quad \forall i=1,2,\dots,p \quad (11)$$

为使监测点数最少,则目标函数为:

$$Y_S = \min \sum_{j=1}^n b_j \quad (12)$$

采用 0-1 整数线性规划方法求解式(11)、(12)构成的优化问题,即可得出保证全网电压暂降可观的监测点配置方案。

### 2.2 传统方法的不足

a. 电压阈值  $U_{th}$  选取困难。

采用传统监测点配置方法,  $U_{th}$  越大所需监测点越少,反之所需监测点越多。  $U_{th}$  选取过大,监测点不能对全网中幅值较小的电压暂降进行有效监测,而这些暂降往往是更应受关注的严重扰动事件;  $U_{th}$  选取过小,则需安装较多的监测装置,经济成本相应增加。监测电压暂降的最终目的,是为反映敏感设备受扰动的严重程度。然而电网中各敏感设备的电压耐受能力不同,且敏感设备对电压暂降的响应具有时空变化特性<sup>[21-22]</sup>。因此,传统方法基于给定的  $U_{th}$  配置监测点,存在  $U_{th}$  选取困难的问题。

b. 非监测点电压暂降特征信息删失。

如图 2 所示,传统监测点配置方法仅将电压用于判断是否低于  $U_{th}$ ,而未充分利用具体的电压幅值信息。监测点配置方案是估计非监测点电压幅值特征的基础,如图 3 所示,电压暂降状态估计需根据监测点电压估计各线路分段故障次数,再计算非监测点电压<sup>[23]</sup>。然而线路上不同位置发生故障引起的电压暂降幅值

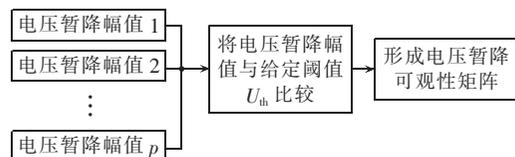


图 2 电压暂降可观性矩阵的构建原理

Fig.2 Principle of voltage-sag observability matrix construction

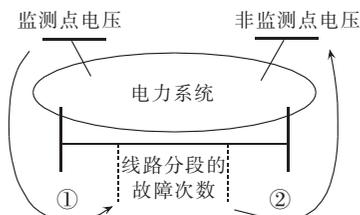


图 3 电压暂降状态估计原理

Fig.3 Principle of voltage-sag state estimation

差异明显,以线路段为单元估计非监测点电压,对暂降幅值特征的刻画过于粗糙,必然导致暂降幅值特征信息的删失。

针对以上问题,本文充分利用电压暂降幅值特征信息,同时考虑到实际中监测装置只记录幅值低于设定阈值的电压暂降事件,提出能保证全网电压暂降及其扰动源位置可观的监测点配置方法。

### 3 考虑扰动源定位的监测点配置方法

#### 3.1 保证全网电压暂降可观的所有配置方案

电压暂降是电压有效值降至额定电压 10%~90% 的短时扰动事件,监测装置基于设定阈值触发并记录暂降数据。实现电压暂降扰动源定位的前提是能记录到电压暂降数据,考虑到电压暂降的定义及电能质量监测装置记录暂降数据的实现原理,本文首先基于 MRA 原理并设  $U_{th}=0.9$  p.u. 配置监测点,作为定位扰动源的初始配置方案,以确保全网中任意母线发生电压暂降时,监测装置能记录到电压暂降数据。由式(11)、(12)确定的监测点配置方案往往并非唯一,可用 0-1 整数线性规划方法先求出一组配置方案,将该方案以式(13)、(14)的形式作为求解下一组方案的新增约束条件,按图 4 所示流程循环求解,即可求出满足式(11)、(12)的所有监测点配置方案。

$$\sum_{j=1}^n b_j = Y_{S,\min} \quad (13)$$

$$\sum_{j \in B^{l-1}} b_j < Y_{S,\min} \quad (14)$$

其中,  $Y_{S,\min}$  为用 0-1 整数线性规划方法求得的最少监测点数;  $B^{l-1}$  表示前次计算所得配置方案。式(13)确保监测点总数维持为  $Y_{S,\min}$ , 式(14)确保新方案与之前求出的方案不重复。

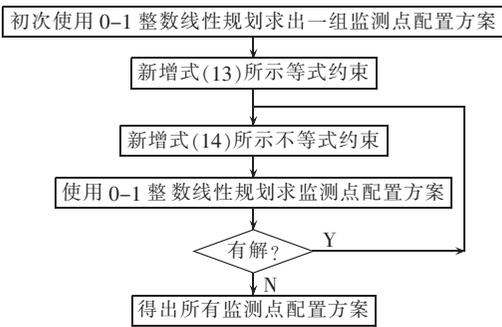


图 4 用 0-1 整数线性规划方法求取所有配置方案  
Fig.4 All allocation schemes solved by 0-1 integer linear programming

#### 3.2 基于节点阻抗矩阵的扰动源定位法

系统中不同位置发生短路故障,母线电压暂降幅值不同<sup>[24]</sup>。因此,可根据母线电压暂降幅值,应用数值计算方法反解求出扰动源位置。以三相短路故障为例,当故障点  $k$  未知时,由式(3)建立方程:

$$f(\lambda) = 1 - \frac{Z_{mk}^1}{Z_{kk}^1} - U_m^{\text{rec}} = 0 \quad (15)$$

其中,  $U_m^{\text{rec}}$  为监测点  $m$  处电压暂降幅值。用弦割法<sup>[25]</sup>求解该方程,迭代公式为:

$$\lambda_{k+1} = \lambda_k - \frac{f(\lambda_k)(\lambda_k - \lambda_{k-1})}{f(\lambda_k) - f(\lambda_{k-1})} \quad (16)$$

当多个监测点同时记录到电压暂降时,可建立多个式(15)形式的方程,共同构成一超定非线性方程组,可用最小二乘法<sup>[26]</sup>求解  $\lambda$ 。

由于扰动源所在线路未知,需遍历所有线路求解扰动源位置,因此求出的解中可能含有伪故障点。此时,可通过增加监测点以唯一确定扰动源位置,在数学上即为通过增加等式约束保证解的唯一性。然而盲目增加监测点,不仅增加了成本,且仍难排除伪故障点,因此需对监测点进行优化配置。

#### 3.3 监测点优化配置方法

应用 3.1 节方法,假设共求出  $c_0$  组监测点配置方案,各组方案均能保证全网中幅值低于 0.9 p.u. 的电压暂降可观,将这些方案表示为:

$$\mathbf{O} = [\mathbf{o}_1 \quad \mathbf{o}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{o}_{c_0}] \quad (17)$$

以  $\mathbf{O}$  为初始所有监测点组合,从全网  $n$  个节点中选取  $x$  个节点与  $\mathbf{O}$  中各组合构成新的监测点组合,新组合总数为:

$$c = c_0 C_n^x \quad (18)$$

其中,  $C_n^x$  为从  $n$  个节点中选取  $x$  个节点的组合总数。

将所有新组合表示为监测点组合向量:

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \quad \mathbf{h}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{h}_c] \quad (19)$$

$\mathbf{H}$  中各监测点组合包含的监测点为:

$$\mathbf{h}_{i+(j-1)c_0} = [\mathbf{o}_i \quad \mathbf{q}_j] \quad (20)$$

$i=1,2,\dots,c_0; j=1,2,\dots,C_n^x$

其中,  $\mathbf{o}_i$  为  $\mathbf{O}$  中第  $i$  组组合;  $\mathbf{q}_j$  为第  $j$  组从  $n$  个节点中选出的含  $x$  个节点的组合。  $\mathbf{H}$  中各组合可能含有重复监测点,但不会影响最后结果。

排除伪故障点后唯一确定电压暂降扰动源位置,称为扰动源可观,定义扰动源可观性矩阵:

$$\mathbf{F}^w = \begin{bmatrix} f_{11}^w & f_{12}^w & \cdots & f_{1c}^w \\ f_{21}^w & f_{22}^w & \cdots & f_{2c}^w \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{g1}^w & f_{g2}^w & \cdots & f_{gc}^w \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中,  $w$  表示故障类型;  $\mathbf{F}^w$  为  $g \times c$  维矩阵;  $g$  为全网中设置的故障点数;  $c$  为监测点组合数。  $\mathbf{F}^w$  中元素取值为:

$$f_{ij}^w = \begin{cases} 1 & \text{采用监测点组合 } \mathbf{h}_j, \text{ 扰动源 } i \text{ 可观} \\ 0 & \text{采用监测点组合 } \mathbf{h}_j, \text{ 扰动源 } i \text{ 不可观} \end{cases} \quad (22)$$

用  $\mathbf{F}^a$  表示考虑了所有故障类型的扰动源可观性矩阵,其维数与  $\mathbf{F}^w$  相同。  $\mathbf{F}^a$  中元素取值为:

$$f_{ij}^a = \prod_{w=1}^4 f_{ij}^w \quad i=1,2,\dots,g; j=1,2,\dots,c \quad (23)$$

$\mathbf{F}^a$  中第  $j$  列元素表示第  $j$  组监测点组合可定位

的扰动源范围。若  $F^a$  中第  $i$  行元素全为 0, 表示当前所有监测点组合均不能唯一确定扰动源  $i$  的位置, 则需增加监测点数量。 $O$  中各组合新增的监测点数  $x$  从 0 开始逐步增加, 直到  $F^a$  中各行至少一个元素不为 0 为止。

定义  $c$  维监测点组合决策向量:

$$D = [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_c] \quad (24)$$

$D$  中元素取值为:

$$d_j = \begin{cases} 1 & \text{采用监测点组合 } h_j \\ 0 & \text{不采用监测点组合 } h_j \end{cases} \quad (25)$$

为保证全网电压暂降扰动源可观, 对  $F^a$  中任意第  $i$  行元素,  $D$  中元素均应满足不等式约束:

$$\sum_{j=1}^c f_{ij}^a d_j \geq 1 \quad \forall i=1, 2, \dots, g \quad (26)$$

为使监测点数最少, 需求出最少的监测点组合数:

$$Y_F = \min \sum_{j=1}^c d_j \quad (27)$$

类似图 4 思想, 用 0-1 整数线性规划方法求出满足式(26)、(27)的所有解, 其中监测点数最少的方案即为最优方案。

综上所述, 考虑扰动源定位的电压暂降监测点最优配置实现流程见图 5。

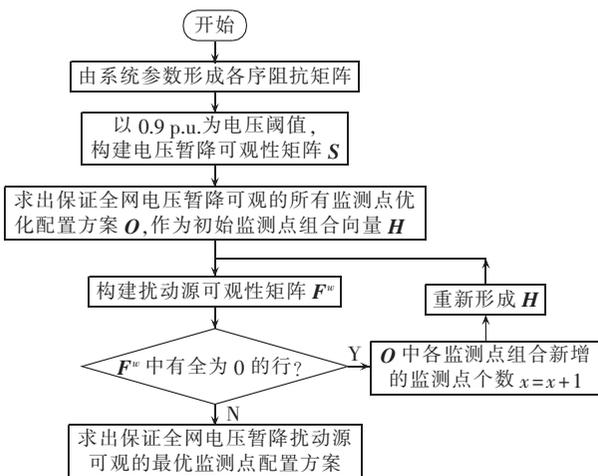


图 5 考虑扰动源定位的电压暂降监测点最优配置  
Fig.5 Optimal allocation of voltage-sag monitoring points considering disturbance-source locating

如图 5 所示, 本文方法只需监测到全网中有电压暂降发生, 并以其扰动源可观为约束进行监测点优化配置, 无需同传统方法一样通过降低  $U_{th}$  以实现对小幅度电压暂降的监测, 因此不存在传统方法中电压阈值选取困难的问题。应用本文方法配置监测点, 电网中发生电压暂降后, 可根据监测点记录的电压暂降数据确定扰动源位置, 然后通过短路计算<sup>[9]</sup>即可准确得出非监测母线电压, 因此克服了传统方法造成的非监测母线电压暂降特征信息删失的问题。

## 4 算例分析

### 4.1 本文方法的验证

应用本文方法对图 6 所示 IEEE 30 节点测试系统<sup>[10]</sup>进行仿真。按图 5 所示流程, 首先以 0.9 p.u. 为电压阈值, 求取保证全网电压暂降可观的所有监测点配置方案, 结果见表 1。

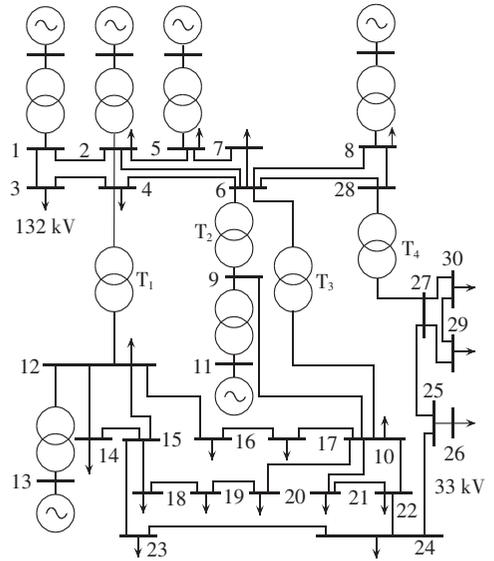


图 6 IEEE 30 节点测试系统

Fig.6 IEEE 30-bus test system

表 1 保证全网电压暂降可观的监测点配置方案

Tab.1 Allocation scheme ensuring grid-wide observability of voltage sags

方案	监测点位置	方案	监测点位置	方案	监测点位置
1	2, 24	7	5, 24	13	7, 24
2	2, 25	8	5, 25	14	7, 25
3	2, 26	9	5, 26	15	7, 26
4	2, 27	10	5, 27	16	7, 27
5	2, 29	11	5, 29	17	7, 29
6	2, 30	12	5, 30	18	7, 30

IEEE 30 节点测试系统共 37 条线路, 每条线路上等间距取 10 个故障点(实际中可根据线路长度选取故障点数), 以表 1 中所有方案作为初始监测点组合, 构建  $370 \times 18$  维扰动源可观性矩阵  $F^a$ 。构建  $F^a$  时需遍历全网线路求解扰动源位置, 用解出的扰动源位置计算监测点电压, 比较监测点计算电压值与实际电压值, 当各相电压之差均小于 0.001 p.u. 时, 才认为该扰动源位置是可行解。按图 5 求出保证全网电压暂降及其扰动源可观的监测点配置方案, 结果见表 2。

为验证本文方法实用性, 在每条线路上等间距取 100 个故障点, 用表 2 中方案对扰动源定位。定义扰动源可观率为:

$$\text{扰动源可观率} = \frac{\text{扰动源可观的电压暂降次数}}{\text{全网电压暂降总次数}} \times 100\% \quad (28)$$

表 2 保证全网扰动源可观的监测点配置方案  
Tab.2 Allocation scheme ensuring grid-wide observability of disturbance sources

方案	监测点位置	方案	监测点位置
1	7,10,24,29	5	7,21,25,30
2	7,10,26,29	6	7,21,26,30
3	7,21,24,29	7	7,21,27,30
4	7,21,24,30	8	7,21,29,30

表 2 中各方案的扰动源可观率如表 3 所示,可见所有方案最低的扰动源可观率也可达到 98.27%,由此验证了本文方法的正确性和实用性。

表 3 最终监测点配置方案的扰动源可观率  
Tab.3 Disturbance source observability rates of final scheme

方案	扰动源可观率/%	方案	扰动源可观率/%
1	98.51	5	98.35
2	98.38	6	98.33
3	98.51	7	98.30
4	98.43	8	98.27

#### 4.2 监测点数量比较

表 4 所示为采用传统方法设置不同电压阈值(标么值)时,全网所需监测点数。

表 4 传统方法不同电压阈值所需监测点数

Tab.4 Monitoring points required by traditional method for different voltage thresholds

电压 阈值	所需监测点数				
	单相接 地短路	两相 短路	两相接 地短路	三相 短路	综合考虑所 有类型短路
0.9	2	2	2	2	2
0.8	5	5	4	4	5
0.7	9	13	8	7	13
0.6	14	18	13	12	18

表 4 中,传统方法采用 0.9 p.u.为电压阈值时,虽只需 2 个监测点,但根据电压暂降域原理<sup>[10,16]</sup>可知,此时监测点对幅值较小的电压暂降存在监测盲区。因此,采用传统方法配置监测点,若电压阈值设置过高,监测点对全网电压暂降的监测能力有限,可获取的暂降特征信息少。由表 4 知,随着电压阈值的降低,为保证全网中无监测盲区,所需监测点数量明显增多。表 2 中本文方法仅需 4 个监测点,即可保证全网电压暂降及其扰动源位置可观,根据扰动源位置经短路计算便能得出非监测母线电压幅值,克服了传统方法中电压阈值选取困难的问题,鲁棒性更好。

#### 4.3 本文方法的应用

在每条线路上等间距设定 100 个三相短路故障点,用表 2 中方案 1 进行监测。任选非监测母线 11—20,应用本文方法统计得出不同电压幅值(标么值)电压暂降次数如表 5 所示。实际应用时,幅值统计区间可根据需要调整。

本文方法通过确定各扰动源位置,经短路计算

表 5 非监测点电压暂降统计  
Tab.5 Statistics of voltage sag at non-monitoring points

非监 测点	电压暂降次数			
	[0.1,0.3)	[0.3,0.5)	[0.5,0.7)	[0.7,0.9)
11	13	23	55	889
12	92	159	853	1902
13	18	33	81	1316
14	304	163	1269	1422
15	194	279	1668	1079
16	157	393	1080	1550
17	205	559	1041	1383
18	280	641	1263	1033
19	264	778	1113	1004
20	296	776	1070	1062

得出非监测母线电压暂降幅值特征。而传统方法无法如本文方法一样对单个电压暂降的特征进行准确刻画,导致非监测母线电压暂降特征信息删失。

此外,对于表 1 中方案,即使不具备条件增加监测点数量以实现全网电压暂降扰动源可观,仍可应用本文方法实现对监测点数据有效利用,并选出最佳配置方案。图 7 为表 1 中 18 组方案对应的扰动源可观率,可见方案 17 的扰动源可观率最高,为最佳配置方案。同理,对于已安装有监测装置的系统,可应用本文方法实现对监测数据的有效利用。

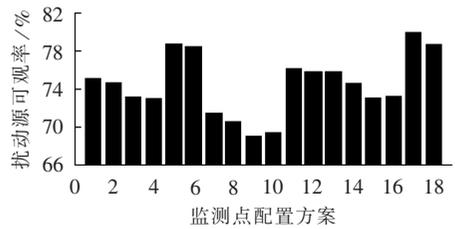


图 7 初始 18 组监测点配置方案的扰动源可观率  
Fig.7 Disturbance source observability rates of initial 18 schemes

### 5 结论

a. 基于扰动源可观性矩阵和监测点最优配置模型,对电压暂降监测点进行优化配置,保证了全网电压暂降及其扰动源位置可观。

b. 对 IEEE 30 节点测试系统的仿真结果表明,本文方法正确、有效,所需监测点数量少,克服了传统方法电压阈值选取困难的问题,具有较好的鲁棒性,且能更精确刻画非监测母线电压暂降特征。

c. 如何考虑发电计划、负荷波动、电网拓扑结构变化等因素对监测点配置的影响,将是下一步研究的重点。

#### 参考文献:

[1] SHORT T A. 配电可靠性与电能质量[M]. 徐政,译. 北京:机械工业出版社,2008:41-46.  
[2] BOLLEN M H J,STOCKMAN K,NEUMANN R,et al. Voltage dip immunity of equipment and installations-messages to stakeholders [C]//15th International Conference on Harmonics and Quality of

- Power. Hong Kong, China: IEEE, 2012: 915-919.
- [3] 雷何, 高山, 林新春, 等. 基于包含谐波模型的加权最小二乘估计算法的电压暂降检测方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 36-41.  
LEI He, GAO Shan, LIN Xinchun, et al. Voltage sag detection based on weighted least-squares estimation algorithm with harmonic models[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 36-41.
- [4] 郑天文, 肖先勇, 张文海, 等. 考虑母线电压暂降非线性分布特征的配电网故障定位[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 115-120.  
ZHENG Tianwen, XIAO Xianyong, ZHANG Wenhai, et al. Fault location considering nonlinear profile of bus voltage sag for distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 115-120.
- [5] 杨达, 肖先勇, 汪颖, 等. 计及失效事件和严重程度不确定性的设备电压暂降失效率评估[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 107-111, 117.  
YANG Da, XIAO Xianyong, WANG Ying, et al. Assessment of equipment invalidation due to voltage sags considering uncertainties of failure and severity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 107-111, 117.
- [6] CHAN J Y, MILANOVIC J V, DELAHUNTY A. Risk-based assessment of financial losses due to voltage sag[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 492-500.
- [7] 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.
- [8] IEEE Standards Coordinating Committee 22 on Power Quality. IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality [S]. New York, USA: [s.n.], 1995.
- [9] SHEN C C, LU C N. A voltage sag index considering compatibility between equipment and supply[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 996-1002.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] PARK C H, JANG G, TOMS R J. The influence of generator scheduling and time-varying fault rates on voltage sag prediction [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 1243-1250.
- [13] LI H Q, XIAO X Y, WANG Y, et al. Probability evaluation method of equipment failure due to voltage sags considering multi-uncertain properties[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2011, 33(3): 608-614.
- [14] AUNG M T, MILANOVIC J V. Stochastic prediction of voltage sags by considering the probability of the failure of the protection system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 322-329.
- [15] OLGUIN G, VUINOVICH F, BOLLEN M H J. An optimal monitoring program for obtaining voltage sag system indexes [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 378-384.
- [16] 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.
- [17] ESPINOSA-JUAREZ 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] AVENDANO-MORA M, MILANOVIC J V. Monitor placement for reliable estimation of voltage sags in power networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 936-944.
- [21] 赵泓, 肖先勇, 李政光, 等. 敏感设备电压暂降失效率区间最大混合熵评估[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(10): 70-75.  
ZHAO Hong, XIAO Xianyong, LI Zhengguang, et al. Estimation of maximum interval hybrid entropy of sensitive equipment failure rate due to voltage sag[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10): 70-75.
- [22] 肖先勇, 陈武, 杨洪耕. 敏感设备电压暂降故障水平的多不确定性评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 36-42.  
XIAO Xianyong, CHEN Wu, YANG Honggeng. Multi-uncertainty assessment for failure level of sensitive equipment caused by voltage sag[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 36-42.
- [23] ESPINOSA-JUAREZ E, HERNANDEZ A. A method for voltage sag state estimation in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2517-2526.
- [24] BOLLEN M. Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions[M]. New York, USA: IEEE Press, 2000: 147-149.
- [25] 胡兵, 李清朗. 现代科学与工程计算基础[M]. 成都: 四川大学出版社, 2003: 245-247.
- [26] 韩雪, 周智. 对最小二乘问题的研究[J]. 济南大学学报: 自然科学版, 2004, 18(3): 273-275.  
HAN Xue, ZHOU Zhi. A new method of solving problem for nonlinear least square[J]. Journal of University of Jinan: Science and Technology, 2004, 18(3): 273-275.

#### 作者简介:



陈礼频

陈礼频(1986-),男,四川成都人,博士研究生,研究方向为电能质量及其控制技术(E-mail: chenlipin235@163.com);

肖先勇(1968-),男,四川宜宾人,教授,博士研究生导师,博士,长期从事电能质量、智能电网的教学和研究工作;

张文海(1989-),男,四川简阳人,博士研究生,研究方向为电网故障选线定位、智能配电网。

(下转第90页 continued on page 90)

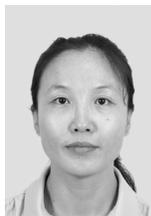
structure coupling finite element analysis and experiment study of AgNi10 contact material under the closed contact stage[J].

Rare Metal Materials and Engineering,2012,41(2):276-280.

[20] 王子建,何俊佳,尹小根. 高压限流型熔断器热电耦合瞬态温度场的计算[J]. 高压电器,2006,42(6):438-441.

WANG Zijian,HE Junjia,YIN Xiaogen. Calculation on thermal-electricity coupled transient temperature field of high voltage current limiting fuse[J]. High Voltage Apparatus,2006,42(6):438-441.

作者简介:



纽春萍

纽春萍(1975-),女,山西闻喜人,副教授,博士后,研究方向为现代电器设计方法及新型开关电器的设计与优化(E-mail:niuyue@mail.xjtu.edu.cn);

董得龙(1988-),男,天津人,硕士研究生,研究方向为电器有限元仿真分析。

## FEM-based calculation of short-time withstand current for air circuit breaker

NIU Chunping,DONG Delong,SUN Hao,NING Jiaqi,YANG Fei,WU Yi,RONG Mingzhe

(School of Electrical Engineering,Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China)

**Abstract:** The main contact system of an ACB(Air Circuit Breaker) is modeled for calculating its electro-dynamic stability and thermal stability,which applies the contact bridge model to describe the microcosmic contacting between movable and fixed contacts,the electric repulsion force and temperature rise of contacts are quantitatively analyzed and its short-time withstand current is evaluated. In electro-dynamic stability calculation,3D transient electromagnetic analysis is used to quantitatively calculate the effect of eddy current on the electric repulsion force. In thermal stability calculation,the improved contact bridge model is applied to obtain the simulative results of transient thermal field. Two schemes,i.e. shifting shaft hole position and increasing contact ending pressure,are introduced and their effect on short-time withstand current is researched based on the established model. An optimal scheme is given.

**Key words:** electric circuit breakers; short-time withstand current; electro-dynamic stability; thermal stability; FEM

(上接第 84 页 continued from page 84)

## Optimal allocation of voltage-sag monitors considering disturbance-source locating

CHEN Lipin<sup>1</sup>,XIAO Xianyong<sup>2</sup>,ZHANG Wenhai<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Information,Sichuan University,Chengdu 610065,China;

2. Smart Grid Key Lab of Sichuan Province,Sichuan University,Chengdu 610065,China)

**Abstract:** Based on the observable area principle of monitoring points and the locating method of voltage-sag disturbance-sources,a disturbance-source observability matrix is built and an optimal allocation model of monitor stations is established,which takes the least monitoring points as its objective and the observability of grid voltage sag and corresponding disturbance source as its constraint. The 0-1 integer linear programming method is adopted to solve the model. Simulative results of IEEE 30-bus test system show that,the proposed method is correct and effective,which,with less monitoring points,avoids the difficulty of voltage threshold selection and obtains more accurate characteristics of voltage sags.

**Key words:** voltage sag; disturbance-source locating; monitoring; observability matrix; 0-1 integer linear programming; models