

DOI: 10.7667/PSPC161475

基于电压暂降监测点优化配置的同心松弛凹陷域分析

郎福龙¹, 田立军², 王滕滕²

(1. 国网冀北电力有限公司唐山供电公司, 河北 唐山 063000; 2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 提出了一种基于电压暂降监测点优化配置的同心松弛凹陷域分析方法。在传统 MRA 法的基础上, 根据变压器的接线方式以及故障点的位置构建系统的零序节点阻抗矩阵, 修正电压暂降幅值, 克服了传统 MRA 法存在监测盲区的缺点, 实现对实际配电网的电压暂降监测点优化配置以及故障定位。根据监测点布点方案以及故障点定位结果, 提出以故障点为中心的同心松弛凹陷域, 定义的提出及分析计算可以有效减少供电部门凹陷域计算的工作量, 为解决由于电压暂降带来的责任归属问题提供理论依据。通过对含有多个电压等级的实际配电网进行仿真分析, 验证了该方法的实用性与有效性。

关键词: 电压暂降; 多电压等级; 优化配置; 故障定位; 同心松弛凹陷域

An analysis to the concentric relaxation vulnerability area of voltage sag based on optimal allocation of voltage sag monitors

LANG Fulong¹, TIAN Lijun², WANG Tengting²

(1. Tangshan Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Supply Company, Tangshan 063000, China;
2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: A method to analyze the concentric relaxation vulnerability area of voltage sag based on optimal allocation of voltage sag monitors is proposed. On the basis of traditional MRA method, zero sequence impedance matrix is constructed according to the transformer connection mode and fault point location, on this basis, the amplitude of voltage sag is modified, which overcomes the shortcomings of monitoring blind spot existing in the traditional MRA method. Then the optimal allocation of the voltage sag monitoring points and fault location of the actual distribution network are realized. According to allocation of voltage sag monitors and result of fault location, the concentric relaxation vulnerability whose center is the fault point is proposed. The proposed definition can effectively reduce the workload involved in traditional voltage sag vulnerability areas and provide us a judgment reference of the attribution of liabilities between power supply department and power users. The practicability and effectiveness of the proposed method are verified by the simulation of the actual distribution network with multiple voltage levels.

This work is supported by Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2012EEM026).

Key words: voltage sag; multi-voltage level; optimal allocation; fault location; concentric relaxation vulnerability area

0 引言

随着电网规模的日益扩大, 用户对电能质量的要求不断提高, 电压暂降问题越来越受到人们的关注^[1-6]。如何做到全网电压暂降可观测的同时安装的监测装置最少是一个具有现实意义的课题。同时随着电力企业越来越关心电能质量问题的责任量化, 界定分清电压暂降事故中供用电双方各自的责任以及进行有效补偿也是一个亟待解决的问题。

目前对于电压暂降监测点优化配置的研究主要

采用可观测区域(Monitor Reach Area, MRA)方法^[7-10], 所采用的仿真算例主要为 IEEE-30、IEEE-33 和 IEEE-39 系统, 而目前我国配电网中所含有的电压等级主要包括 220 kV、110 kV、35 kV、10 kV、0.4 kV, 标准节点测试含有电压等级较少, 不能完全描述我国实际配电网的特征, 因此传统 MRA 法能否对实际配电网进行电压暂降监测点优化配置仍有待验证。

传统电压暂降凹陷域以敏感负荷为中心, 其定义为系统发生故障引起电压暂降时, 所关心的敏感负荷不能正常工作的故障点所在区域。国内外对于传统电压暂降凹陷域的研究方法主要有临界距离法^[11]、故障点法^[12-13]、直接法^[14]、系统重构法^[15]、

解析式法^[16]和虚拟节点法^[17]等。但是, 随着电网中敏感负荷数量不断增多, 基于传统凹陷域定义, 对所有敏感负荷进行凹陷域分析难以实现, 由此增加了供电部门的工作难度。

本文在传统 MRA 法的基础上, 将系统中的母线节点按照电压等级进行分类, 根据故障位置所处的电压等级不同, 构建不同的零序节点阻抗矩阵, 同时针对变压器的接线方式以及故障点与监测母线是否位于同一电压等级来确定母线的电压暂降幅值是否含有零序分量, 以此来对电压暂降幅值进行修正, 实现电压暂降监测点的优化配置。根据监测点最优配置结果, 以故障时监测点电压幅值为量测量, 应用最小二乘原理进行故障点定位估计。在此基础上, 相较于传统方法中以敏感负荷为中心的凹陷域分析, 定义了以故障点为中心的电压暂降同心松弛凹陷域, 能够有效减少供电部门凹陷域分析的工作量, 有利于明确供用电双方的责任归属。本文采用含有 4 个电压等级的实际配电网进行仿真验证, 并将所提方法与传统 MRA 法进行对比, 验证了本文所提方法的实用性和可靠性。

1 传统 MRA 法

1.1 电压暂降幅值

发生短路故障以后, 监测点 m 的各相电压表达式如下所述。

1) 三相短路故障

$$V_{mabc} = 1 - \frac{Z_{mf}^1}{Z_{ff}^1} \quad (1)$$

2) A 相接地短路故障

$$\begin{cases} V_{ma} = 1 - \frac{Z_{mf}^{(0)} + Z_{mf}^{(1)} + Z_{mf}^{(2)}}{Z_{ff}^{(0)} + Z_{ff}^{(1)} + Z_{ff}^{(2)}} \\ V_{mb} = \alpha^2 - \frac{Z_{mf}^{(0)} + \alpha^2 Z_{mf}^{(1)} + \alpha Z_{mf}^{(2)}}{Z_{ff}^{(0)} + Z_{ff}^{(1)} + Z_{ff}^{(2)}} \\ V_{mc} = \alpha - \frac{Z_{mf}^{(0)} + \alpha Z_{mf}^{(1)} + \alpha^2 Z_{mf}^{(2)}}{Z_{ff}^{(0)} + Z_{ff}^{(1)} + Z_{ff}^{(2)}} \end{cases} \quad (2)$$

3) B、C 两相短路故障

$$\begin{cases} V_{ma} = 1 - \frac{Z_{mf}^{(1)} - Z_{mf}^{(2)}}{Z_{ff}^{(1)} + Z_{ff}^{(2)}} \\ V_{mb} = \alpha^2 - \frac{\alpha^2 Z_{mf}^{(1)} - \alpha Z_{mf}^{(2)}}{Z_{ff}^{(1)} + Z_{ff}^{(2)}} \\ V_{mc} = \alpha - \frac{\alpha Z_{mf}^{(1)} - \alpha^2 Z_{mf}^{(2)}}{Z_{ff}^{(1)} + Z_{ff}^{(2)}} \end{cases} \quad (3)$$

4) B、C 两相接地短路故障

$$\begin{cases} V_{ma} = 1 - \frac{(Z_{mf}^{(1)} - Z_{mf}^{(2)})Z_{ff}^{(0)} + (Z_{mf}^{(1)} - Z_{mf}^{(2)})Z_{ff}^{(2)}}{Z_{ff}^{(1)}Z_{ff}^{(0)} + Z_{ff}^{(1)}Z_{ff}^{(2)} + Z_{ff}^{(2)}Z_{ff}^{(0)}} \\ V_{mb} = \alpha^2 - \frac{(\alpha^2 Z_{mf}^{(1)} - \alpha Z_{mf}^{(2)})Z_{ff}^{(0)} + (\alpha^2 Z_{mf}^{(1)} - Z_{mf}^{(2)})Z_{ff}^{(2)}}{Z_{ff}^{(1)}Z_{ff}^{(0)} + Z_{ff}^{(1)}Z_{ff}^{(2)} + Z_{ff}^{(2)}Z_{ff}^{(0)}} \\ V_{mc} = \alpha - \frac{(\alpha Z_{mf}^{(1)} - \alpha^2 Z_{mf}^{(2)})Z_{ff}^{(0)} + (\alpha Z_{mf}^{(1)} - Z_{mf}^{(2)})Z_{ff}^{(2)}}{Z_{ff}^{(1)}Z_{ff}^{(0)} + Z_{ff}^{(1)}Z_{ff}^{(2)} + Z_{ff}^{(2)}Z_{ff}^{(0)}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\alpha = e^{j120^\circ}$; m 表示监测点, 下标 a 、 b 、 c 表示三相, 上标 1、2、0 表示正、负、零序分量; Z_{mf} 和 Z_{ff} 分别表示监测点 m 和故障点 f 之间的互阻抗和故障点 f 的自阻抗。

1.2 可观测矩阵

所谓 MRA, 即系统中出现短路故障时, 监测点 m 能观测到的区域。整个电网系统的 MRA 可以用一个 $N \times F$ 阶 0-1 矩阵 M 表示, 即可观测矩阵

$$M(i, j) = \begin{cases} 1, & V_{ij} \leq V_t \quad \forall i=1, 2, \dots, N \\ 0, & V_{ij} > V_t \quad \forall j=1, 2, \dots, F \end{cases} \quad (5)$$

式中: N 表示节点数; F 表示故障点数; V_t 表示电压暂降阈值。

定义状态变量:

$$x(i) = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 是监测点} \\ 0, & \text{节点 } i \text{ 不是监测点} \end{cases} \quad \forall i=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

目标函数:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N x(i) \quad (7)$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^N x(i) \cdot M(i, j) \geq 1 \quad (8)$$

式(5)一式(8)中以设置的监测点最少为目标, 以电压暂降可观测为约束条件, 构成 0-1 线性规划数学模型, 进行求解, 即可确定全网电压暂降监测点优化配置方案。

1.3 传统 MRA 法的不足

文献[9]中选取新英格兰 39 节点系统进行仿真分析, 设定电压暂降阈值为 0.9, 在单相短路故障下, 选取母线 8 和母线 18 为监测点, 则从理论上讲, 系统中任意位置发生故障均可观测。为验证文献[9]中所采用方法的正确性, 采用 PSASP7.1 搭建新英格兰 39 节点仿真模型, 设定系统中的变压器接线方式均为 YN, d11, 当系统中母线 29 处出现 A 相接地短路故障时, 监测点 8 和 18 的电压幅值如表 1 所示。

表 1 母线电压幅值

Table 1 Voltage magnitude of bus

母线名	零序电压 幅值	A 相电压 幅值	B 相电压 幅值	C 相电压 幅值
BUS-18	0.0026	0.9053	0.9456	0.9602
BUS-8	0.0013	0.9486	0.9578	0.9621

由表 1 可以看出, 文献[9]中所设置的监测母线 8 和监测母线 18 均不能监测到母线 29 发生短路故障, 使得系统中存在监测盲区, 不能满足系统全面可观测的基本要求。

2 改进 MRA 法

本文针对传统 MRA 法的不足, 提出了改进 MRA 法, 将系统中的母线按照电压等级进行分类, 根据监测母线与被监测线路所处的相对位置的不同构建不同的零序阻抗矩阵以及对电压暂降幅值进行修正。

2.1 零序节点阻抗矩阵的改进

当短路故障发生于变压器三角形或中性点不接地的星形侧时, 变压器的零序电抗为 ∞ 。当故障发生于变压器中性点接地的星形一侧时, 对于 YN, d1 接线变压器, 当中性点直接接地时, 零序电抗与正序电抗相等, 即 $X_0=X_1$, 当中性点经电抗 X_n 接地时, $X_0=X_1+3X_n$; 对于 YN, y 接线变压器, $X_0=X_1+X_{m0}$, 其中 X_{m0} 为零序励磁电抗; 对于 YN, yn 接线变压器, $X_0=X_1+X$, 其中 X 为外电路电抗。以上情况的分类如表 2 所示。

表 2 故障位于星形接地侧时变压器零序电抗

Table 2 Transformer's zero-sequence reactance when fault is in grounded Y side

变压器接线方式	零序电抗
YN, d (中性点直接接地)	$X_0=X_1$
YN, d (中性点经 X_n 接地)	$X_0=X_1+3X_n$
YN, y	$X_0=X_1+X_{m0}$
YN, yn	$X_0=X_1+X$

从以上分析不难看出, 当短路故障发生在系统的不同位置时, 对应系统的零序阻抗矩阵也不同, 因此, 传统方法中利用单一的零序阻抗矩阵来确定电压暂降幅值不能满足精确计算的要求, 从而造成最终的配置结果不够精确。准确的做法是根据系统中监测点与被监测线路之间的相对位置关系确定不同的零序阻抗矩阵, 以此来求电压暂降幅值, 进行优化配置。

2.2 电压暂降幅值修正

当变压器低压侧绕组的联结形式为星形(Y)或者三角形(D)时, 变压器不能传递零序电压^[18]。系统

发生三相短路或两相短路时, 不含有零序分量, 因此变压器接线方式的改变对于三相短路故障以及两相短路故障影响不大。当系统中发生 B、C 两相接地短路故障时, 监测点处 A 相电压的三序分量为

$$\begin{cases} V_{\text{map}} = 1 - \frac{Z_{\text{mf}}^{(1)}Z_{\text{ff}}^{(0)} + Z_{\text{mf}}^{(1)}Z_{\text{ff}}^{(2)}}{Z_{\text{ff}}^{(1)}Z_{\text{ff}}^{(0)} + Z_{\text{ff}}^{(1)}Z_{\text{ff}}^{(2)} + Z_{\text{ff}}^{(2)}Z_{\text{ff}}^{(0)}} \\ V_{\text{man}} = \frac{Z_{\text{mf}}^{(2)}Z_{\text{ff}}^{(0)}}{Z_{\text{ff}}^{(1)}Z_{\text{ff}}^{(0)} + Z_{\text{ff}}^{(1)}Z_{\text{ff}}^{(2)} + Z_{\text{ff}}^{(2)}Z_{\text{ff}}^{(0)}} \\ V_{\text{maz}} = \frac{Z_{\text{mf}}^{(0)}Z_{\text{ff}}^{(2)}}{Z_{\text{ff}}^{(1)}Z_{\text{ff}}^{(0)} + Z_{\text{ff}}^{(1)}Z_{\text{ff}}^{(2)} + Z_{\text{ff}}^{(2)}Z_{\text{ff}}^{(0)}} \end{cases} \quad (9)$$

当监测点处不含有零序电压时, 其三相电压为

$$\begin{cases} V_{\text{ma}} = 1 - \frac{(Z_{\text{mf}}^{(1)} - Z_{\text{mf}}^{(2)})Z_{\text{ff}}^{(0)} + Z_{\text{mf}}^{(1)}Z_{\text{ff}}^{(2)}}{Z_{\text{ff}}^{(1)}Z_{\text{ff}}^{(0)} + Z_{\text{ff}}^{(1)}Z_{\text{ff}}^{(2)} + Z_{\text{ff}}^{(2)}Z_{\text{ff}}^{(0)}} \\ V_{\text{mb}} = \alpha^2 - \frac{(\alpha^2 Z_{\text{mf}}^{(1)} - \alpha Z_{\text{mf}}^{(2)})Z_{\text{ff}}^{(0)} + \alpha^2 Z_{\text{mf}}^{(1)}Z_{\text{ff}}^{(2)}}{Z_{\text{ff}}^{(1)}Z_{\text{ff}}^{(0)} + Z_{\text{ff}}^{(1)}Z_{\text{ff}}^{(2)} + Z_{\text{ff}}^{(2)}Z_{\text{ff}}^{(0)}} \\ V_{\text{mc}} = \alpha - \frac{(\alpha Z_{\text{mf}}^{(1)} - \alpha^2 Z_{\text{mf}}^{(2)})Z_{\text{ff}}^{(0)} + \alpha Z_{\text{mf}}^{(1)}Z_{\text{ff}}^{(2)}}{Z_{\text{ff}}^{(1)}Z_{\text{ff}}^{(0)} + Z_{\text{ff}}^{(1)}Z_{\text{ff}}^{(2)} + Z_{\text{ff}}^{(2)}Z_{\text{ff}}^{(0)}} \end{cases} \quad (10)$$

我国配电网中 0.4 kV 和 110 kV 及以上系统采用中性点直接接地, 3~60 kV 系统中性点不接地或经消弧线圈接地, 对于中性点不接地系统, 其发生单相接地故障时, 线电压仍然正常, 同时其电压暂降经过变压器传递以后其相电压也恢复正常^[19-20], 因此, 在非有效接地系统中, 一般不对单相故障进行电压跌落分析。

在有效接地系统中, A 相接地短路故障时监测点处 A 相电压三序分量为

$$\begin{cases} V_{\text{map}} = 1 - \frac{Z_{\text{mf}}^{(1)}}{Z_{\text{ff}}^{(0)} + Z_{\text{ff}}^{(1)} + Z_{\text{ff}}^{(2)}} \\ V_{\text{man}} = -\frac{Z_{\text{mf}}^{(2)}}{Z_{\text{ff}}^{(0)} + Z_{\text{ff}}^{(1)} + Z_{\text{ff}}^{(2)}} \\ V_{\text{maz}} = -\frac{Z_{\text{mf}}^{(0)}}{Z_{\text{ff}}^{(0)} + Z_{\text{ff}}^{(1)} + Z_{\text{ff}}^{(2)}} \end{cases} \quad (11)$$

当监测点处不含有零序电压时, 其三相电压为

$$\begin{cases} V_{\text{ma}} = 1 - \frac{Z_{\text{mf}}^{(1)} + Z_{\text{mf}}^{(2)}}{Z_{\text{ff}}^{(0)} + Z_{\text{ff}}^{(1)} + Z_{\text{ff}}^{(2)}} \\ V_{\text{mb}} = \alpha^2 - \frac{\alpha^2 Z_{\text{mf}}^{(1)} + \alpha Z_{\text{mf}}^{(2)}}{Z_{\text{ff}}^{(0)} + Z_{\text{ff}}^{(1)} + Z_{\text{ff}}^{(2)}} \\ V_{\text{mc}} = \alpha - \frac{\alpha Z_{\text{mf}}^{(1)} + \alpha^2 Z_{\text{mf}}^{(2)}}{Z_{\text{ff}}^{(0)} + Z_{\text{ff}}^{(1)} + Z_{\text{ff}}^{(2)}} \end{cases} \quad (12)$$

式中, V_{map} 、 V_{man} 、 V_{maz} 分别表示监测点 m 处 A 相的正序电压、负序电压、零序电压。其他字母表示的变量与前文相同。

3 电压暂降监测点优化配置仿真分析

为验证本文所提方法的正确性, 采用含有 4 个电压等级的某地区实际配电网作为算例, 进行仿真分析。由于 10 kV 电压等级以下配电线路较多, 其线路信息不完整, 故本文 10 kV 电压等级只取发电机所在母线, 该实际配电网共有母线 56 条, 发电站 6 座, 变电站 8 座, 220 kV 线路 4 条, 110 kV 线路 23 条, 35 kV 线路 32 条, 双绕组变压器接线方式为 YNd11, 三绕组变压器的接线方式为 YNyn0d11。

表 3 给出了电压暂降为 0.9 时, 不同故障类型下的监测点配置情况。表 3 中 SLGF、LLF、DLGF 和 3PF 分别表示单相接地短路、两相短路、两相接地短路和三相短路故障。

表 3 不同故障下监测点配置方案

Table 3 Optimal allocation of monitoring points under different fault types

故障类型	SLGF	LLF	DLGF	3PF	全局
监测点个数	3	2	2	2	3
最优配置方案	30,37,55	30,55	30,55	30,55	30,37,55

图 1 给出了电压暂降阈值为 0.9 的情况下, 发生三相短路故障时, 监测点 30 和监测点 55 的可观测区域, 直观地说明了选择母线 30 和母线 55 为系统电压暂降监测点, 能够做到电压暂降的完全可观测。

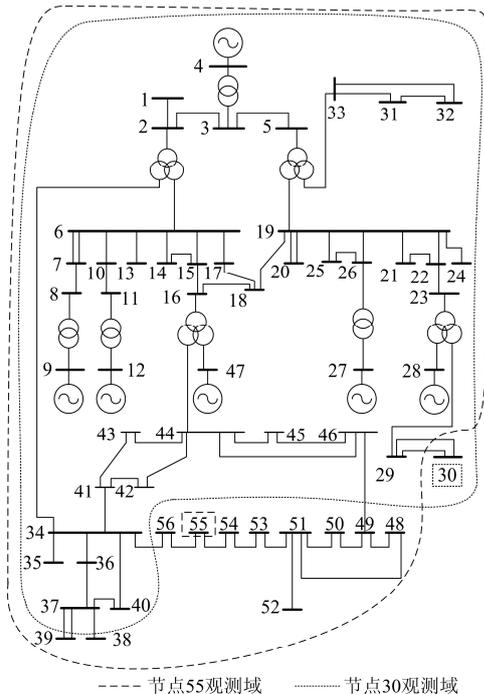


图 1 三相短路故障下监测点监测范围

Fig. 1 MRA of the monitoring buses for 3PF

图 2 和图 3 则分别给出了两相接地短路故障下应用传统 MRA 法和改进 MRA 法的监测点优化配置情况。可以看出, 传统 MRA 法在进行配置时存在监测盲区, 而改进 MRA 法能够克服这一缺点。

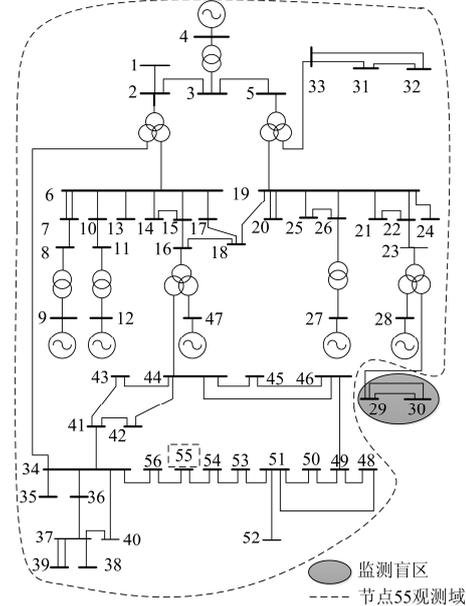


图 2 传统 MRA 法两相接地短路故障下监测点可观测域

Fig. 2 MRA of the monitoring buses for DLGF by traditional MRA method

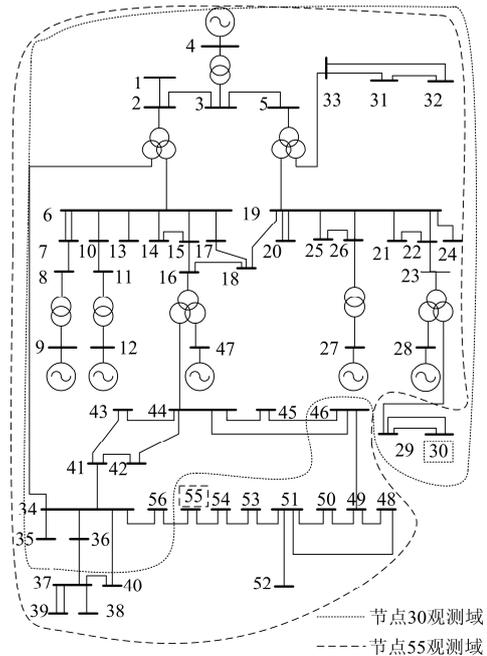


图 3 改进 MRA 法两相接地短路故障下监测点可观测域

Fig. 3 MRA of the monitoring buses for DLGF by improved MRA method

4 同心松弛凹陷域仿真分析

在监测点布点方案的基础上, 利用文献[21]的方法, 对故障点进行定位, 接着以故障点为中心, 进行同心松弛凹陷域分析。图4为母线6和10之间, 距离母线6距离2.7 km处发生单相接地短路故障时, 电压暂降阈值分别为0.3、0.5、0.8时的同心松弛凹陷域。

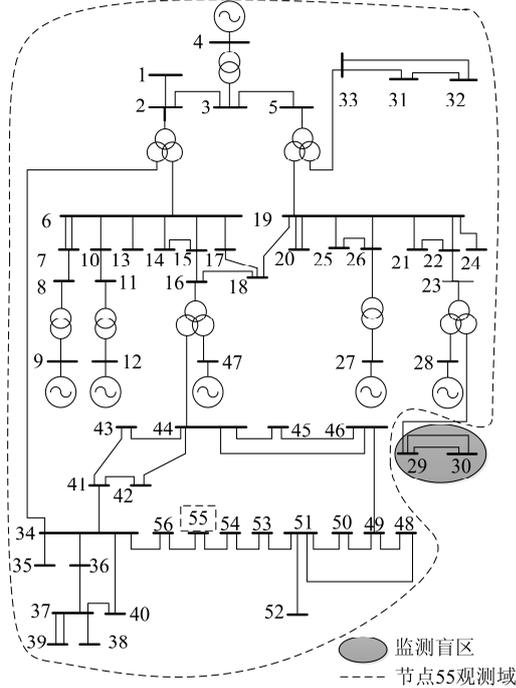


图4 线路两相短路引起的凹陷域

Fig. 4 Areas of vulnerability caused by LLF

假设系统中有 N 个敏感负荷, 某次短路故障发生后, 传统定义需要进行 N 次凹陷域分析, 而本文所提同心松弛凹陷域只需要以故障点为中心进行一次凹陷域分析即可, 有效地减小了凹陷域分析的工作量。本文所提方法可以方便地求取某次故障引起的同心松弛凹陷域, 可为解决供电部门与电力用户的责任纠纷问题提供参考依据。

5 结论

本文提出了基于电压暂降监测点优化配置的同心松弛凹陷域分析方法, 将系统中的母线按照电压等级进行分类, 根据监测母线与被监测线路相对位置关系确定零序阻抗矩阵, 克服了传统方法构建单一零序阻抗矩阵的缺点, 同时根据变压器的接线方式以及系统是否有效接地对电压暂降幅值进行修正, 针对传统 MRA 法采用的仿真算例主要为标准节点测试系统的问题, 本文采用含有 4 个电压等级

的实际配电网进行仿真分析, 通过将本文所提方法与传统 MRA 法所得结果进行对比表明, 本文所提的方法能够解决传统 MRA 法对实际配电网进行优化配置时存在监测盲区的问题, 有效对含有多个电压等级的实际配电网进行电压暂降监测点优化配置。在优化配置的基础上, 相较于传统凹陷域以敏感负荷为中心, 本文提出以故障点为中心的同心松弛凹陷域, 可以有效地减少供电部门凹陷域分析的工作量, 有助于解决由于电压暂降产生的责任划分问题。

参考文献

[1] 程志友, 王雪菲, 徐佳. 一种基于复阻抗的电压暂降定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 149-154.
CHENG Zhiyou, WANG Xuefei, XU Jia. A voltage sag detection method based on complex impedance[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 149-154.

[2] 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: 8pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0018-9

[3] 黄小庆, 曹阳, 吴卫良, 等. 考虑电压暂降指标的电压协调控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 147-154.
HUANG Xiaoqing, CAO Yang, WU Weiliang, et al. Research on voltage coordination control method considering voltage sag index[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 147-154.

[4] 赵莹, 赵川, 叶华, 等. 应用主成分分析约简电压暂降扰动源识别的方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 105-110.
ZHAO Ying, ZHAO Chuan, YE Hua, et al. Method to reduce identification feature of different voltage sag disturbance source based on principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 105-110.

[5] 肖助力, 龚仁喜, 陈双. 一种改进不完全 S 变换的电压暂降检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 62-68.
XIAO Zhuli, GONG Renxi, CHEN Shuang. Detection of voltage sag by a modified incomplete S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 62-68.

[6] 马莉, 刘健, 周倩, 等. 面向电压暂降的电网结构评估[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(8): 21-25.
MA Li, LIU Jian, ZHOU Qian, et al. Grid structure

- evaluation based on voltage sag[J]. *Power System and Clean Energy*, 2015, 31(8): 21-25.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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 optimal allocation method of voltage sag monitoring nodes based on particle swarm optimization algorithm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(4): 181-187.
- [11] BOLLEN M H J. Fast assessment methods for voltage sags in distribution system[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, 32(6): 1480-1487.
- [12] AUNG M T, MILANOVIC J V, GUPTA C P. Propagation of asymmetrical sags and the influence of boundary crossing lines on voltage sag prediction[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, 19(4): 1819-1827.
- [13] SANINTA P, PREMRUDEEPREECHACHARN S. Assessment and prediction of voltage sag in transmission system in northern area of Thailand[C] // *Harmonics and Quality of Power*, 2008. ICHQP 2008. 13th International Conference on: IEEE, 2008: 1-6.
- [14] 肖先勇, 王希宝, 薛丽丽, 等. 敏感负荷电压凹陷敏感度的随机估计方法[J]. *电网技术*, 2007, 31(22): 30-33.
XIAO Xianyong, WANG Xibao, XUE Lili, et al. A method stochastically estimate voltage sag of sensitive equipments[J]. *Power System Technology*, 2007, 31(22): 30-33.
- [15] 李庚银, 杨晓东, 周明. 复杂配电网的电压暂降随机预估方法[J]. *电工技术学报*, 2009, 24(11): 134-141.
LI Gengyin, YANG Xiaodong, ZHOU Ming. Stochastic estimation method of voltage sags in complex distribution systems[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(11): 134-141.
- [16] 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. A new method to accurately determine areas of vulnerability for stochastic prediction of voltage sags[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2011, 31(4): 64-68.
- [17] 陈伟, 赵锦苹. 复杂电网中电压跌落凹陷域的仿真分析[J]. *电网技术*, 2014, 38(5): 1322-1327.
CHEN Wei, ZHAO Jinping. Simulation analysis on vulnerability area of voltage dip in complex power grid[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(5): 1322-1327.
- [18] 陶顺, 周双亚, 肖湘宁, 等. 基于 IEC61970 公共信息模型的电压凹陷域分析[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(9): 40-46.
TAO Shun, ZHOU Shuangya, XIAO Xiangning, et al. Analysis of area of vulnerability based on common information model in IEC61970[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(9): 40-46.
- [19] 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.
- [20] 刘玥朋, 于明涛, 管春伟, 等. 基于电压暂降的标准 SARFI 参数与 ITIC 曲线分析保护装置对电压暂降的影响[J]. *电网与清洁能源*, 2015, 31(8): 15-20.
LIU Yapeng, YU Mingtao, GUAN Chunwei, et al. Influence of SARFI parameter based on voltage sag and itic curve analysis protection device on voltage sag[J]. *Power System and Clean Energy*, 2015, 31(8): 15-20.
- [21] 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.

收稿日期: 2016-09-07; 修回日期: 2016-12-21

作者简介:

郎福龙(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制; E-mail: 1104927566@qq.com

田立军(1964—), 男, 通信作者, 教授, 电力系统运行与分析, 电能质量分析与控制; E-mail: tlj3796@sdu.edu.cn

王滕滕(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制。E-mail: 244388431@qq.com

(编辑 姜新丽)