

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

邱玉涛¹,肖先勇¹,熊 茜²,赵 恒²,李 忠²

(1. 四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065;

2. 国网四川省电力公司资阳供电公司,四川 资阳 641300)

摘要:降低暂降可观测矩阵的维数和减少监测装置优化配置时间是电网电压暂降监测装置优化配置面临的两大困难。基于现有暂降可观测区域原理,引入临界阻抗和等效阻抗的概念,利用广度优先-条件搜索形成暂降母线集,合并导致相同暂降特征的故障点,构造全网暂降可观测矩阵,降低了矩阵维数,减少了优化配置的计算量,在保证配置结果正确的前提下,有效减少了优化配置时间。对 IEEE 30、IEEE 118 和 IEEE 300 节点系统仿真,验证了所提方法的正确性和适用性,并证明,电网规模越大,所提方法对优化配置时间的改进效果越明显。

关键词:电压暂降; 监测; 可观测矩阵; 可观测性; 临界阻抗; 条件搜索; 优化

中图分类号: TM 71

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.023

0 引言

电压暂降是系统正常运行中不可避免的电能质量事件^[1-3],对其进行监测和评估是采取有效措施的前提^[4-9],实际中不可能也没必要对所有母线进行监测。因此,研究电网中电压暂降监测装置的优化配置是准确把握全网暂降水平的重要课题^[10-18],具有重要理论价值和现实意义。

国内外对暂降监测装置的优化配置问题开展了大量研究,主要归纳为 3 种方法:图论法、故障定位法、暂降可观测区域 MRA (Monitor Reach Area) 法。文献[11]考虑电网拓扑结构,基于图论进行监测装置配置,但仅适用于辐射型配网,未考虑暂降传播特性。文献[12]基于故障定位思想构造可观测矩阵,能对全网故障点唯一准确定位,但监测装置安装数量多,优化时间长,对 IEEE 30 节点系统仿真,优化配置时间至少需 3 d,实用性不强。目前,国内外应用最广的是 MRA 法,该方法以监测装置数量最少为目标,以全网暂降可观为约束,适用于任意电网拓扑和故障类型,实用性较强。文献[13]提出了 MRA 原理,并以此构造暂降可观测矩阵,用 0-1 规划法求解,但仅考虑了母线故障和三相接地故障;文献[14-16]提出改进可观测矩阵法,减少监测盲区,其中文献[15-16]考虑了全网任意地点和故障类型引起暂降的可能性,所得暂降观测方程更准确、完备;文献[17]、[18]分别提出基于遗传算法、

禁忌搜索算法的观测方程求解方法。这些方法在不同程度上提高了监测装置配置的全局最优性,但均依赖于暂降可观测矩阵,观测方程维数高、计算量大,推广应用困难。因此,降低观测方程维数、减少优化配置时间,是急需解决的问题。

本文在 MRA 法的基础上,引入临界阻抗和等效阻抗的概念,以此判定故障是否导致母线暂降;同时,考虑到电网内暂降传播特性,提出一种广度优先-条件搜索算法,形成暂降母线集,减少搜索母线数;然后通过合并导致相同暂降特征的故障点,构造全网暂降可观测矩阵。本文方法有效减少了计算量,降低了观测方程的维数,减少了优化配置时间。通过对 IEEE 30、118 和 300 节点系统的仿真,验证了本文方法的正确性和适用性。结果证明,与 MRA 法相比,本文方法在保证配置结果正确的前提下,明显减少了暂降监测装置优化配置时间。

1 MRA 法的不足与对策

1.1 MRA 法原理

电网暂降 MRA 定义为:当电网内故障引起电压暂降时,监测点能观测到的引起该暂降的故障点所在区域。基于 MRA 法的监测装置配置原理为:构造全网暂降可观测矩阵,建立观测方程,通过优化求解该方程确定监测方案。

设 n 为全网母线数, p 为总故障数,任意故障类型下的全网暂降可观测矩阵 M^w 为:

$$M^w = \begin{bmatrix} m_{11}^w & m_{12}^w & \cdots & m_{1p}^w \\ m_{21}^w & m_{22}^w & \cdots & m_{2p}^w \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_{n1}^w & m_{n2}^w & \cdots & m_{np}^w \end{bmatrix} \quad (1)$$

收稿日期:2013-09-27;修回日期:2014-07-15

基金项目:四川省科技支撑计划资助项目(2013GZ0062);四川省电力公司科技项目

Project supported by the Science and Technology Pillar Program of Sichuan Province(2013GZ0062) and the Science and Technology Program of Sichuan Electric Power Company

其中, w 为故障类型, 取 0、1、2、3, 分别表示三相接地、单相接地、两相相间和两相接地故障; M^w 为 $n \times p$ 阶 0-1 二值矩阵。元素取值为:

$$m_{ij}^w = \begin{cases} 1 & U_{ij} \leq U_{th} \\ 0 & U_{ij} > U_{th} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, p; U_{th}$ 为监测装置设置的暂降阈值; U_{ij} 为 j 点故障时母线 i 的剩余电压值。

M^w 的物理意义为: 第 i 行元素表示母线 i 的 MRA 范围, 取值为 1 表示故障点在 MRA 内, 取值为 0 表示在 MRA 外; 第 j 列元素表示 j 点故障引起的电压暂降可被观测的母线, 取值为 1 表示暂降可被观测, 取值为 0 表示不能观测。

1.2 存在的问题

基于 MRA 法的暂降监测装置优化配置方法, 需对所有故障点、母线和可能设置的暂降阈值进行全面分析, 方法复杂、繁琐。尤其在构造可观测矩阵 M^w 时, 对每个故障点遍历所有母线, 每一次遍历均需做多次计算, 尤其是必须进行短路计算, 其计算量很大^[19]。当电网越来越复杂时, 至少存在三方面问题: 母线数增多, 计算时间线性增长; 对于任意故障点, 用短路计算求各母线剩余电压均需使用母线与故障点的互阻抗和故障点自阻抗, 计算量大; 为避免监测盲区, 可观测矩阵 M^w 的列数多, 建立的观测方程多, 导致约束条件多, 优化时间长。

1.3 解决措施

以降低可观测矩阵维数、减少计算量为目标, 结合 MRA 法存在的问题, 可采取以下措施:

a. 引入临界阻抗和等效阻抗的概念, 作为判定母线是否暂降的条件, 对于给定故障点, 用故障点的自阻抗确定临界阻抗, 除两相接地故障外, 计算母线等效阻抗仅用母线与故障点的互阻抗, 减少每次判定暂降的计算量;

b. 从故障点所在线路两端母线出发, 基于广度优先搜索法, 仅搜索 M^w 中故障点所在列元素值为 1 的母线, 并形成对应故障点的暂降母线集, 其余母线对应元素值取 0, 减少每次被搜索的母线数;

c. 合并导致相同暂降特征的故障点, 降低可观测矩阵维数, 减少监测装置优化配置时间。

2 基于临界阻抗与等效阻抗的 M^w 构造

为减少可观测矩阵构造时间, 引入临界阻抗和等效阻抗的概念。以等效阻抗大于或等于临界阻抗作为判定母线暂降的条件, 并确定可观测矩阵的元素取值。针对不同故障类型, 给出相应的临界阻抗与等效阻抗的计算公式。

计算模型如图 1 所示。设 m 为待求母线, 母线 i, j 之间的线路 $i-j$ 故障, f 为故障点, k 为点 f 到母

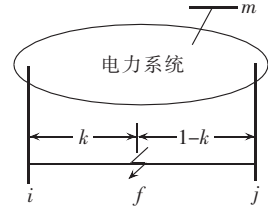


图 1 电力系统短路计算模型

Fig.1 Short-circuit calculation model of power system

线 i 的归一化距离, 确定方法如式(3)所示。 k 取值从 0 到 1 表示 f 从 i 到 j 。

$$k = \frac{L_{if}}{L_{ij}} \quad (3)$$

其中, L_{if} 为母线 i 到故障点 f 的距离; L_{ij} 为线路 $i-j$ 的长度。

m 与 f 的互阻抗 Z_{mf}^s 、 f 的自阻抗 Z_{ff}^s 分别定义为:

$$Z_{mf}^s = (1-k)Z_{mi}^s + kZ_{mj}^s \quad (4)$$

$$Z_{ff}^s = (1-k)^2Z_{ii}^s + k^2Z_{jj}^s + 2k(1-k)Z_{ij}^s + k(1-k)z_{ij}^s \quad (5)$$

其中, s 取 1、2、0 分别表示正序、负序和零序; Z_{mi}^s 、 Z_{mj}^s 和 Z_{ij}^s 为节点互阻抗; Z_{ii}^s 和 Z_{jj}^s 为节点自阻抗; z_{ij}^s 为线路 $i-j$ 阻抗。

可见, Z_{mf}^s 与 k 、 Z_{mi}^s 和 Z_{mj}^s 有关, 当故障位置和电网拓扑确定时, Z_{mf}^s 仅与待求母线有关; Z_{ff}^s 与 k 、 z_{ij}^s 、 Z_{ii}^s 、 Z_{jj}^s 和 Z_{ij}^s 有关, 当故障位置和电网拓扑确定时, Z_{ff}^s 确定。

为简化计算, 设各母线暂降前电压为 1 p.u. (也可取实际值^[20]), 忽略故障阻抗影响, 旋转因子 $\alpha = e^{j120^\circ}$, 当点 f 三相接地短路时, 母线 m 的剩余电压 U_m 为:

$$U_m = \text{abs} \left(1 - \frac{Z_{mf}^1}{Z_{ff}^1} \right) \quad (6)$$

其中, $\text{abs}(\cdot)$ 表示取有效值。

可见, U_m 取决于 Z_{mf}^1 、 Z_{ff}^1 。当故障位置和电网拓扑确定时, Z_{ff}^1 为定值, m 与 f 的等效阻抗 Z_{eq} 就是其互阻抗的模值:

$$Z_{eq} = \text{mod}(Z_{mf}^1) \quad (7)$$

其中, $\text{mod}(\cdot)$ 表示取模值。

设暂降阈值为 U_{th} , 由式(6)可得临界阻抗 Z_{crit} :

$$Z_{crit} = \text{mod}((1-U_{th})Z_{ff}^1) \quad (8)$$

如果发生不对称故障, 可用对称分量法进行分析, 取幅值最小一相的电压作为等效剩余电压。

通过等效剩余电压和暂降阈值可得不同故障类型对应的临界阻抗 Z_{crit} 和等效阻抗 Z_{eq} , 如式(9)—(14)所示。

a. 单相接地故障。

$$Z_{eq} = \max \{ \text{mod}(Z_{mf}^0 + Z_{mf}^1 + Z_{mf}^2), \text{mod}(Z_{mf}^0 + \alpha^2 Z_{mf}^1 + \alpha Z_{mf}^2), \text{mod}(Z_{mf}^0 + \alpha Z_{mf}^1 + \alpha^2 Z_{mf}^2) \} \quad (9)$$

$$Z_{crit} = \max \{ \text{mod}((1-U_{th})(Z_{ff}^0 + Z_{ff}^1 + Z_{ff}^2)), \text{mod}((\alpha^2 - U_{th})(Z_{ff}^0 + Z_{ff}^1 + Z_{ff}^2)), \text{mod}((\alpha - U_{th})(Z_{ff}^0 + Z_{ff}^1 + Z_{ff}^2)) \} \quad (10)$$

b. 两相相间故障。

$$Z_{eq} = \max \{ \text{mod}(Z_{nf}^1 - Z_{nf}^2), \text{mod}(\alpha^2 Z_{nf}^1 - \alpha Z_{nf}^2), \text{mod}(\alpha Z_{nf}^1 - \alpha^2 Z_{nf}^2) \} \quad (11)$$

$$Z_{crit} = \max \{ \text{mod}((1 - U_{th})(Z_{ff}^1 + Z_{ff}^2)), \text{mod}((\alpha^2 - U_{th})(Z_{ff}^1 + Z_{ff}^2)), \text{mod}((\alpha - U_{th})(Z_{ff}^1 + Z_{ff}^2)) \} \quad (12)$$

c. 两相接地故障。

$$Z_{eq} = \max \{ \text{mod}((Z_{nf}^1 - Z_{nf}^0)Z_{ff}^2 + (Z_{nf}^1 - Z_{nf}^2)Z_{ff}^0), \text{mod}((\alpha^2 Z_{nf}^1 - Z_{nf}^0)Z_{ff}^2 + (\alpha^2 Z_{nf}^1 - \alpha Z_{nf}^2)Z_{ff}^0), \text{mod}((\alpha Z_{nf}^1 - Z_{nf}^0)Z_{ff}^2 + (\alpha Z_{nf}^1 - \alpha^2 Z_{nf}^2)Z_{ff}^0) \} \quad (13)$$

$$Z_{crit} = \max \{ \text{mod}((1 - U_{th})(Z_{ff}^0 Z_{ff}^1 + Z_{ff}^1 Z_{ff}^2 + Z_{ff}^2 Z_{ff}^0)), \text{mod}((\alpha^2 - U_{th})(Z_{ff}^0 Z_{ff}^1 + Z_{ff}^1 Z_{ff}^2 + Z_{ff}^2 Z_{ff}^0)), \text{mod}((\alpha - U_{th})(Z_{ff}^0 Z_{ff}^1 + Z_{ff}^1 Z_{ff}^2 + Z_{ff}^2 Z_{ff}^0)) \} \quad (14)$$

比较 Z_{eq} 和 Z_{crit} 可判定母线是否暂降, 见式(15):

$$\begin{cases} Z_{eq}^w(m) \geq Z_{crit}^w(U_{th}) & \text{母线 } m \text{ 发生暂降} \\ Z_{eq}^w(m) < Z_{crit}^w(U_{th}) & \text{母线 } m \text{ 不发生暂降} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)对应于式(2), 但无需进行短路计算, 仅用阻抗大小进行判定。

由式(7)、(9)、(11)和(13)可知, 发生两相接地故障, 求 Z_{eq} 时需用 Z_{nf} 和 Z_{ff} , 其他类型故障仅需用到 Z_{nf} ; 而 MRA 法对所有故障类型进行短路计算时, 均需用到 Z_{nf} 和 Z_{ff} 。表 1 给出了构造 M^w 中某列元素时使用阻抗的次数。假设全网 n 条母线, 给定故障引起暂降的母线 n_1 条, 显然, $n_1 \leq n$ 。

表 1 构造 M^w 某列元素的比较
Table 1 Comparison of M^w column elements between two methods

方法	对象	M^w 取值依据	故障类型	计算量
MRA 法	所有母线 (n 条)	母线剩余电压、电压暂降阈值	4 种类型故障	互阻抗 n 次
				自阻抗 n 次
本文方法	暂降母线 (n_1 条)	临界阻抗、等效阻抗	两相接地故障	互阻抗 n_1 次
			单相接地故障	自阻抗 n_1 次
			其余 3 类故障	互阻抗 n_1 次 自阻抗 1 次

可见, MRA 法对任意故障类型构造 M^w 矩阵的每一列均需计算 $2n$ 次; 本文方法, 两相接地故障计算 $2n_1$ 次, 其余 3 类故障仅计算 $n_1 + 1$ 次, 计算量明显减少。

3 暂降母线集广度优先-条件搜索

全网任意地点故障均可能引起母线电压降低, 但并非所有母线均发生可观测暂降。引起可观测暂降的故障仅在 MRA 范围内。监测装置设定的暂降阈值越小, MRA 越小。因此, 当暂降阈值和电网拓扑确定时, 给定故障点对应的发生可观测暂降的母

线确定, 这些母线可构成一个集合, 定义为暂降母线集。优化配置监测装置时, 仅需对暂降母线集进行搜索, 其余母线不用搜索, 就可大量减少计算量。从故障引起暂降的角度看, 电网是一有向图。因此, 提出一种广度优先-条件搜索法进行监测装置优化配置。从故障点所在线路两端母线出发, 逐层搜索暂降母线, 形成暂降母线集。以图 2 给出的 IEEE 9 节点系统为例, 设母线 7、8 间线路 7-8 发生三相接地故障, f 为故障点, 故障归一化距离 $k = 0.5$ p.u., 暂降阈值 $U_{th} = 0.8$ p.u.。算法步骤如下:

- 由式(8)计算给定故障点 f 的临界阻抗 Z_{crit} ;
- 由式(7)计算故障线路首端母线 7 与故障点 f 的等效阻抗 Z_{eq} , 由式(15)判定母线 7 是否发生可观测暂降, 若发生则从母线 7 开始搜索下一层母线, 否则停止搜索;
- 用广度优先搜索法逐层搜索与母线 7 有可达路径的母线, 为保证每条母线仅被访问一次, 可采用哈希表进行判重^[21];
- 每搜索一条母线均用式(15)进行判定, 若未发生可观测暂降, 则对该母线剪枝, 否则继续搜索;
- 若故障线路末端母线 8 已被搜索, 全部搜索过程结束, 否则从母线 8 开始再次搜索, 重复步骤 b—d;
- 由搜索所得母线构造暂降母线集。

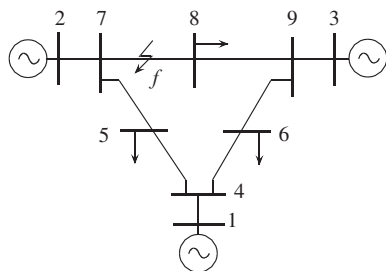


图 2 IEEE 9 节点系统
Fig.2 IEEE 9-bus system

4 暂降监测装置优化配置算法

对任意类型故障, 各线路等间距取 e 个故障点, 全网共设置 p 个故障点。用上述方法确定 p 个故障点的暂降母线集。若同一线路上相邻 2 个及以上故障点的暂降母线集相同, 说明这些故障点导致相同的暂降特征, 则合并这些故障点, 得全网 q 个故障点 ($q \leq p$) 及其暂降母线集, M^w 中故障点所在列的元素如果包含于暂降母线集, 元素取值为 1, 否则为 0。这样, M^w 变为 $n \times q$ 阶 0-1 二值矩阵, 针对所有故障类型的全网暂降可观测矩阵 M 为:

$$M = [M^0 \ M^1 \ M^2 \ M^3] \quad (16)$$

其中, M^0 、 M^1 、 M^2 、 M^3 分别为三相接地、单相接地、两相相间和两相接地故障对应的暂降可观测矩阵, 列

数分别为 q_1 、 q_2 、 q_3 和 q_4 。

设全网 n 条母线,配置监测装置的决策向量为:

$$\mathbf{X}=[x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n] \tag{17}$$

$\mathbf{X}$ 的元素取值为:

$$x_i=\begin{cases} 1 & \text{配置监测装置} \\ 0 & \text{不配置监测装置} \end{cases} \tag{18}$$

其中, $i=1,2,\cdots,n$ 。

以监测装置安装数量最少为目标,构造优化配置的目标函数:

$$\min \sum_{i=1}^n x_i \tag{19}$$

以任意位置的任意类型故障引起的暂降至少能被 1 台装置监测为约束条件,构造观测方程为:

$$\sum_{i=1}^n x_i m_{ij} \geq 1 \tag{20}$$

其中, $j=1,2,\cdots,q_1+q_2+q_3+q_4$ 。

由式(19)、(20)构成的优化问题,可用 0-1 规划法求解。优化配置流程如图 3 所示。

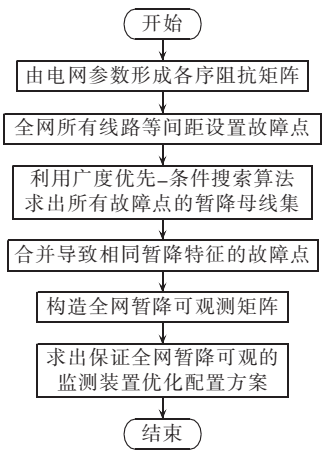


图 3 全网电压暂降监测装置优化配置流程图
Fig.3 Flowchart of optimal system-wide voltage sag monitor placement

5 算例分析

为验证本文方法的正确性和适用性,在相同仿真条件下,用本文方法分别对 IEEE 30、118 和 300 节点系统进行仿真,并与文献[15-16]方法相比较。

仿真用计算机的配置参数: Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E7500 @2.93 GHz, 2GB 内存; 采用 Microsoft Windows XP Professional 操作系统; 仿真软件采用 MATLAB 2008a 版本。

5.1 IEEE 30 节点系统仿真

对文献[16]给出的 IEEE 30 节点系统(IEEE 30 RTS)进行仿真。系统共 30 条母线、37 条线路,各线路等间距取 20 个故障点。考虑母线和线路发生任意类型故障,得所有故障点的暂降母线集,合并导致相同暂降特征的故障点,形成全网暂降可观测矩阵。

暂降阈值分别取 0.9 p.u.、0.8 p.u. 和 0.7 p.u., 得任意类型故障的监测装置优化配置结果,与文献[15-16]方法所得结果比较,如表 2 所示。

表 2 不同暂降阈值监测装置优化配置结果
Table 2 Results of optimal sag monitor placement for different sag thresholds

暂降 阈值	方法	配置 数量	位置
0.9	文献[15-16]	2	7、30
	本文	2	7、30
0.8	文献[15-16]	5	2、4、5、17、30
	本文	5	2、4、5、17、30
0.7	文献[15-16]	12	2、3、4、5、6、7、9、15、20、26、28、30
	本文	12	2、3、4、5、6、7、9、15、20、26、28、30

可见,不同暂降阈值下,本文方法所得结果与文献[15-16]方法一致,证明本文方法正确。

暂降阈值分别取 0.9 p.u.、0.8 p.u. 和 0.7 p.u. 时,本文方法的配置总时间分别为 3.31 s、2.76 s 和 2.48 s,而文献[15-16]方法的时间分别为 10.53 s、10.86 s 和 11.22 s。本文方法所用时间至少减少了 68.6%。

5.2 IEEE 118 节点系统仿真

对文献[15]给出的 IEEE 118 节点系统(IEEE 118 RTS)进行仿真。系统共有 118 条母线、170 条线路。各线路等间距取 20 个故障点,暂降阈值分别取 0.9 p.u.、0.8 p.u. 和 0.7 p.u., 本文方法和文献[15-16]均采用 0-1 规划法求解式(19)和(20),可观测矩阵构造时间 t_c 、可观测矩阵列数 q 、0-1 规划法优化时间 t_o 和监测装置优化配置总时间 t_t 如表 3 所示。

表 3 不同暂降阈值计算时间
Table 3 Calculation time for different sag thresholds

暂降 阈值	文献[15-16]方法				本文方法			
	t_c/s	q	t_o/s	t_t/s	t_c/s	q	t_o/s	t_t/s
0.9	127.38	14280	28.61	155.99	42.02	4317	5.41	47.43
0.8	130.18	14280	37.70	167.88	36.86	3431	3.95	40.81
0.7	128.96	14280	49.75	178.71	24.63	2805	3.43	28.06

5.3 IEEE 300 节点系统仿真

对文献[22]给出的 IEEE 300 节点系统(IEEE 300 RTS)进行仿真。系统共 300 条母线、411 条线路。暂降监测装置优化配置时间如表 4 所示。

表 4 不同暂降阈值计算时间
Table 4 Calculation time for different sag thresholds

暂降 阈值	文献[15-16]方法				本文方法			
	t_c/s	q	t_o/s	t_t/s	t_c/s	q	t_o/s	t_t/s
0.9	926	44548	298	1224	213	8443	31	244
0.8	912	44548	358	1270	159	7398	26	185
0.7	923	44548	372	1295	108	6695	23	131

暂降阈值分别取 0.9 p.u.、0.8 p.u. 和 0.7 p.u. 时,对 IEEE 118 节点和 300 节点系统进行仿真,并与文献[15-16]方法比较。图 4 和图 5 分别为可观测矩阵构造时间和监测装置优化配置总时间减少的百分比。

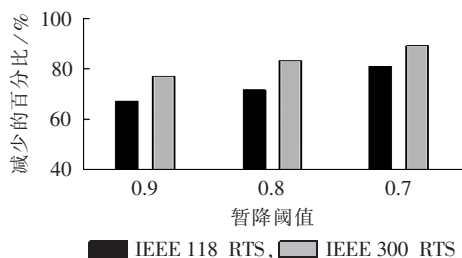


图4 可观测矩阵构造时间减少的百分比

Fig.4 Percentages of time consumption reduction for observability matrix construction

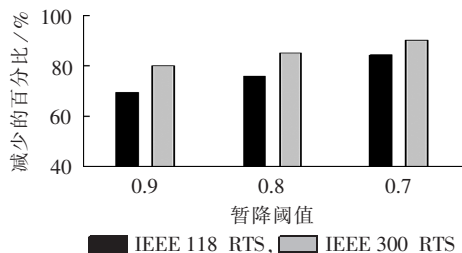


图5 暂降监测装置配置时间减少的百分比

Fig.5 Percentages of time consumption reduction for sag monitor placement

5.4 仿真分析

监测装置优化配置总时间主要取决于可观测矩阵构造时间和暂降观测方程求解时间。由表3和表4可知,可观测矩阵构造时间是0-1规划优化时间的8倍左右,即优化配置时间主要取决于可观测矩阵构造时间。文献[17]、[18]分别用遗传算法和禁忌搜索算法求解暂降观测方程,未改进可观测矩阵的构造方式,监测装置配置时间变化不明显。本文改进了可观测矩阵的构造方式,降低了可观测矩阵的维数,明显减少了监测装置配置时间。

对于不同暂降阈值,文献[15-16]方法的配置时间基本不变,而本文方法随着阈值降低,所需时间越来越少。这是因为阈值越低,故障点所触发的暂降母线数就减少,广度优先-条件搜索形成的暂降母线集中母线数减少,因而可观测矩阵构造时间相应减少。

由图4、图5可知,IEEE 118节点和300节点系统的仿真结果均证明了本文方法的有效性,且电网规模越大,优势越明显。

6 结论

a. 基于广度优先-条件搜索算法的暂降监测装置优化配置方法正确,可有效降低可观测矩阵的维数和减少优化配置时间;

b. 用临界阻抗和等效阻抗判定暂降母线,并搜索暂降母线集,避免了遍历全网所有母线进行短路计算,有效减少了计算量;

c. 合并导致相同暂降特征的故障点,降低了暂降可观测矩阵的维数,减少了优化配置时间;

d. 电网规模越大,本文方法对优化配置时间的

改进效果越明显,有一定工程应用价值。

本文方法有效降低了可观测矩阵维数,避免了不必要的计算,减少了监测装置优化配置时间。如何将该方法应用于实际,是下一步研究的课题。

参考文献:

- [1] BOLLEN M. Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions[M]. New York, USA: IEEE Press, 2000: 139-140.
- [2] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(三)——电力系统的电压凹陷[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(12): 1-4.
YANG Honggeng, XIAO Xianyong, LIU Junyong. Issues and technology assessment on power quality 3: voltage sags in power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(12): 1-4.
- [3] 杨达,肖先勇,汪颖. 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.
YANG Da, XIAO Xianyong, WANG Ying. Assessment of equipment invalidation due to voltage sags considering uncertainties of failure and severity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 107-111.
- [4] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 124.
- [5] 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.
- [6] 肖先勇,陈卫东,杨洪耕,等. 以用户满意度区间数为测度的电压暂降频次评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 104-110.
XIAO Xianyong, CHEN Weidong, YANG Honggeng, et al. Voltage sags frequency assessment under the measure of interval data of customer satisfaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 104-110.
- [7] 焦东升,陆冬良,应俊豪,等. 基于Profibus的电能质量实时监测系统[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(5): 117-121.
JIAO Dongsheng, LU Dongliang, YING Junhao, et al. Real-time power quality monitoring system based on Profibus[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(5): 117-121.
- [8] 肖先勇,李政光,陈武,等. 考虑故障阻抗与多级变压器影响的电压凹陷评估[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 43-47.
XIAO Xianyong, LI Zhengguang, CHEN Wu, et al. Voltage sag assessment considering fault impedance and cascaded transformers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 43-47.
- [9] 陶顺,肖湘宁. 电力系统电能质量评估体系架构[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 171-175.
TAO Shun, XIAO Xiangning. Infrastructure of the power quality assessment system of power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 171-175.
- [10] 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.
- [11] WON D J, MOON S. Optimal number and locations of power quality monitors considering system topology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 288-295.
- [12] LIAO Y. Fault location observability analysis and optimal meter placement based on voltage measurements[J]. Electric Power

- Systems Research, 2009, 79(7): 1062-1068.
- [13] OLGUIN G, VUINOVICH F, BOLLEN M. An optimal monitoring program for obtaining voltage sag system indexes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 378-384.
- [14] 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.
- [15] ESPINOSA J 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.
- [16] 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.
- [17] ALMEIDA C F M, KAGAN N. Using genetic algorithms and fuzzy programming to monitor voltage sags and swells[J]. IEEE Intelligent Systems, 2011, 26(2): 46-53.
- [18] GARCIA M S, ESPINOSA J E, HEMANDEZ A. Analysis of system operation state influence on the optimal location of voltage sag monitors by applying tabu search[C]//North American Power Symposium (NAPS) 2010. Arlington, TX, USA: [s.n.], 2010: 1-6.
- [19] 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.
- [20] 肖先勇, 徐培栋, 陈卫东, 等. 配电系统电压凹陷幅值与频次的区间估计[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(9): 7-10.
- XIAO Xianyong, XU Peidong, CHEN Weidong, et al. Interval evaluation of voltage sag magnitude and frequency in distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(9): 7-10.
- [21] 冯林, 金博, 于瑞云. 图论及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2012: 33.
- [22] University of Washington Electrical Engineering. 300 bus power flow test case [EB/OL]. (1993-08-15). [2013-09-20]. http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf300/pg_tca300bus.htm.

作者简介:



邱玉涛

邱玉涛(1989—),男,天津人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量及其控制技术(E-mail: qiu yutao123456@126.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、智能电网方面的教学和研究工作(E-mail: xiaoxianyong@163.com)。

Optimal sag monitor placement based on critical impedance and breadth first-condition search

QIU Yutao¹, XIAO Xianyong¹, XIONG Qian², ZHAO Heng², LI Zhong²

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

2. Ziyang Power Supply Company, State Grid Sichuan Electric Power Company, Ziyang 641300, China)

Abstract: The crucial measure in the optimal placement of voltage sag monitors is the reduction of the observability matrix dimensionality and time consumption. Based on the exiting monitor reach area theory, the concepts of equivalent impedance and critical impedance are introduced. Breadth first-condition search algorithm is applied to form the set of bus with voltage sag. The fault points resulting in same voltage sag characteristics are merged to build the system-wide sag observability matrix. The dimensionality of the observability matrix and the calculation load are thus reduced, which effectively speeds up the placement of sag monitors while ensures its correctness. Simulations are carried out for IEEE 30-bus, IEEE 118-bus and IEEE 300-bus systems and the simulative results verify the validity and feasibility of the proposed method, showing that, the larger the power system is, the more obvious the effect of time consumption reduction is.

Key words: voltage sag; monitoring; observability matrix; observability; critical impedance; conditional search; optimization