

基于模糊控制模型的电压暂降监测装置优化配置

唐亚迪,徐永海,洪旺松

(华北电力大学 电气与电子工程学院,北京 102206)

摘要: 提出了一种基于模糊控制模型和粒子群算法的电压暂降监测装置的优化配置方法。针对传统基于可观测区域(MRA)的方法的不足,提出了模糊阈值和观测指数的概念。考虑监测点观测能力,建立模糊控制模型以构造优化目标函数,进而采用离散粒子群优化(BPSO)算法对电压暂降监测装置进行优化配置。通过 IEEE 30 节点测试系统对所提方法进行仿真分析,并将所提方法和传统方法得到的配置结果相比较,结果表明所提方法不仅实现了全网电压暂降的完全可观测,而且实现了监测装置的最优配置。

关键词: 电压暂降; 监测; 优化; 模糊控制; 模糊阈值; 观测指数; 离散粒子群优化算法; 模型

中图分类号: TM 715

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.08.010

0 引言

电压暂降对敏感设备的影响是国外发达国家最为关心的电能质量问题^[1-4],在国内其关注程度也越来越高^[5-6]。安装电能质量监测装置是获取电压暂降信息、进行相关问题分析的重要手段。但从经济性方面考虑,一般只在特定的重要母线上安装电能质量监测装置。因而如何在适当的母线上,在保证不遗漏重要数据的基础上安装最少的监测装置,利用其获取的电压暂降信息,进行全网整体电压暂降特性的分析,是一个重要的问题。

在以往的研究中,文献[7]首先提出了监测点优化配置的概念并且建立了基于可观测区域(MRA)的优化模型,在此基础上文献[8-10]运用各种线性优化方法进行优化,但文献[8-10]中的优化模型完全依赖于严格的暂降阈值,仅以监测点最小个数为目标函数,这样往往得出多个可行方案而无法给出最优结果。文献[11-12]运用故障识别法进行优化模型的建立,将 MRA 转变为故障可识别矩阵,由于监测目标提高到故障点可定位,可能会使监测装置安装数量较多。

针对电压暂降的监测问题,本文建立了基于模糊模型和离散粒子群优化(BPSO)算法的优化模型,提出了模糊边界的概念,充分利用电压暂降特征值信息,不仅给出了监测点的观测区域,并且给出了每条母线在该区域内的影响值大小,有助于选择最优的配置方案。采用所提出方法,首先基于短路故障分析中得到的数据建立基于模糊边界的电压暂降观测域;建立 Mamdani 模糊模型和 Sugeno 模糊模型,其中 Mamdani 模型用于计算各个母线的观测

指数,Sugeno 模型用于构造优化的目标函数,目标函数既能反映监测点数目又能反映方案的优劣;对于建立的目标函数,采用具有收敛速度快、鲁棒性好等性能的 BPSO 算法进行优化,得到最少监测装置数量和最优安装位置的方案;最后,本文以 IEEE 30 节点系统作为算例,验证了所提出方法的优越性。

1 电压暂降幅值计算

在电压暂降发生原因中,短路占了绝大多数,本文仅以短路故障来分析计算电压暂降幅值。如图 1 所示,假设 m 为监测点,短路故障发生在电网中线路 $g-h$ 上的 f 点处,故障阻抗为 z_f ,故障点 f 和 g 点的距离为 l ,定义:

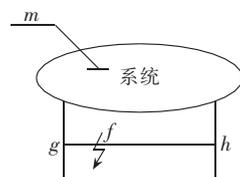


图 1 电力系统短路故障计算模型

Fig.1 Model of power system short circuit calculation

$$l = \frac{L_{gf}}{L_{gh}} \quad (1)$$

其中, L_{gf} 为节点 g 与故障点 f 间的距离; L_{gh} 为线路 $g-h$ 的总长度。由上式可知当 l 在 0~1 之间变化时表示故障点 f 的位置从节点 g 向节点 h 移动。

m 与 f 之间的互阻抗和 f 的自阻抗分别为:

$$Z_{mf}^u = (1-l)Z_{mg}^u + lZ_{mf}^u \quad (2)$$

$$Z_{ff}^u = (1-l)^2Z_{gg}^u + l^2Z_{hh}^u + 2l(1-l)Z_{gh}^u + l(1-l)z_{ff}^u \quad (3)$$

其中, u 为阻抗的次序,当 u 取 0、1、2 时分别表示该阻抗为零序、正序和负序阻抗; Z_{mg}^u 和 Z_{mh}^u 分别为节点 m 、 g 和节点 m 、 h 之间的互阻抗; Z_{gg}^u 和 Z_{hh}^u 分别为节点 g 和节点 h 的自阻抗; Z_{gh}^u 为节点 g 、 h 间的互阻抗; z_{ff}^u 为线路 $g-h$ 的阻抗。

设各节点故障前电压均为 1 p.u., f 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如下。

收稿日期:2014-07-03;修回日期:2015-05-27
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277069)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277069)

(1) 三相短路故障。

$$U_{m,A,B,C} = 1 - \frac{Z_{mf}^1}{Z_{jf}^1} \quad (4)$$

(2) 单相接地短路故障。

$$\begin{cases} U_{m,A} = 1 - \frac{Z_{mf}^0 + Z_{mf}^1 + Z_{mf}^2}{Z_{jf}^0 + Z_{jf}^1 + Z_{jf}^2} \\ U_{m,B} = \alpha^2 - \frac{Z_{mf}^0 + \alpha^2 Z_{mf}^1 + \alpha Z_{mf}^2}{Z_{jf}^0 + Z_{jf}^1 + Z_{jf}^2} \\ U_{m,C} = \alpha - \frac{Z_{mf}^0 + \alpha Z_{mf}^1 + \alpha^2 Z_{mf}^2}{Z_{jf}^0 + Z_{jf}^1 + Z_{jf}^2} \end{cases} \quad (5)$$

其中, α 为算子, $\alpha = e^{j120^\circ}$ 。

(3) 两相短路故障。

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

(4) 两相接地短路故障。

$$\begin{cases} U_{m,A} = 1 - \frac{(Z_{mf}^1 - Z_{mf}^0)Z_{jf}^2 + (Z_{mf}^1 - Z_{mf}^2)Z_{jf}^0}{Z_{jf}^0 Z_{jf}^1 + Z_{jf}^1 Z_{jf}^2 + Z_{jf}^2 Z_{jf}^0} \\ U_{m,B} = \alpha^2 - \frac{(\alpha^2 Z_{mf}^1 - Z_{mf}^0)Z_{jf}^2 + (\alpha^2 Z_{mf}^1 - \alpha Z_{mf}^2)Z_{jf}^0}{Z_{jf}^0 Z_{jf}^1 + Z_{jf}^1 Z_{jf}^2 + Z_{jf}^2 Z_{jf}^0} \\ U_{m,C} = \alpha - \frac{(\alpha Z_{mf}^1 - Z_{mf}^0)Z_{jf}^2 + (\alpha Z_{mf}^1 - \alpha^2 Z_{mf}^2)Z_{jf}^0}{Z_{jf}^0 Z_{jf}^1 + Z_{jf}^1 Z_{jf}^2 + Z_{jf}^2 Z_{jf}^0} \end{cases} \quad (7)$$

由以上计算方法可得到不同故障类型下的电压凹陷域矩阵。用一个 $N \times F$ 的矩阵表示, N 和 F 分别为系统母线数和故障点数。

2 传统方法的不足和改进

2.1 基于 MRA 的优化方法及其不足

几乎所有的研究中都依赖一个严格的电压阈值来判别电压是否发生暂降, 通过比较阈值和短路计算所得的电压幅值得到电压暂降 MRA。MRA 是指系统中发生故障时, 使某一监测点发生电压暂降的故障点所在区域。MRA 实质上是凹陷域的另一种表达形式。与凹陷域矩阵相对应, MRA 为一个 $N \times F$ 的矩阵。

$$M_{i,j} = \begin{cases} 1 & V_{ij} \leq p \\ 0 & V_{ij} > p \end{cases} \quad (8)$$

其中, i 为观测母线, j 为故障点; t 为故障类型, 如上所述, 分为三相短路、单相短路、两相短路和两相接地短路故障, 每种故障建立一个对应的 MRA; $M_{i,j}$ 表示在某种故障下, 故障点 j 发生故障时, 监测点 i 能否监测到暂降, 其值为 1 表示可监测到暂降, 其值为 0 表示不能监测到暂降; p 为电压暂降阈值; V_{ij} 为凹陷域矩阵 \mathbf{V}_{dp} 中第 i 行第 j 列的值, 表示故障点 j 发生短路故障时节点 i 的电压有效值。定义向量 \mathbf{X} 为 N 维向量, 各维 x_i 表示母线 i 的监测点安装情况。

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{母线 } i \text{ 安装了监测装置} \\ 0 & \text{母线 } i \text{ 没有安装监测装置} \end{cases} \quad (9)$$

为了确保每个故障都要被监测点监测到, 算法要保证对于 MRA 中任意第 i 行元素, \mathbf{X} 中元素满足以下约束条件:

$$\sum_{i=1}^N x_i M_{i,j} \geq b_j \quad (10)$$

其中, t 为故障类型; b_j 为每个故障点需要至少被观测到的次数。

传统优化配置中目标函数为监测点数目:

$$F = \min \sum_{i=1}^N x_i \quad (11)$$

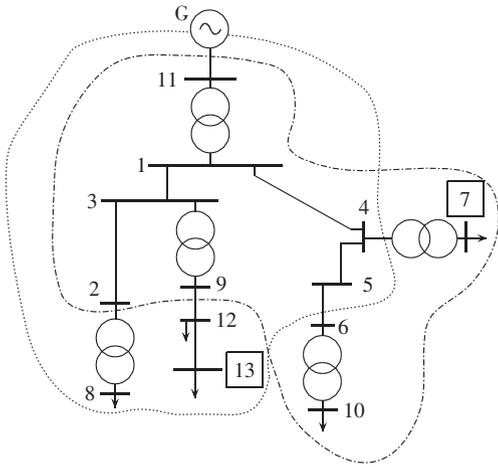
对于电压暂降而言, MRA 内发生的能引发该母线电压暂降的短路故障都应该触发该母线上的监测装置, 而在监测域外发生的故障则不应该触发该母线上的监测装置。因而这种优化方法得到的监测装置配置依赖电压暂降阈值, 并且由于目标函数单一, 传统的方法往往会得出多个可行方案, 而无法给出最优方案。

为了说明传统优化配置方法的缺点, 用传统方法对文献[13]中的 13 节点系统进行电压暂降监测点的配置, 图 2 所示为三相短路故障时 2 种配置方案示意图。2 种方案均可满足全网暂降可观测, 但是传统方法无法给出哪一个方案更好。

根据对该系统短路计算所得的电压暂降幅值可知, 图 2(a) 所示的方案中监测点 13 的可观测区域内, 最大电压暂降幅值为 0.89 p.u. (故障发生在节点 8 时); 图 2(b) 所示的方案中监测点 12 的最大电压暂降幅值为 0.78 p.u. (故障发生在节点 6 时)。由于在实际情况下暂降值会受到各种因素影响 (如接地电阻等) 而改变^[7], 当节点 8 发生故障时, 节点 13 的电压暂降计算值 0.89 p.u. 接近阈值 0.9 p.u., 若实际值大于 0.9 p.u., 则不会触发监测点 13, 而节点 8 又不在监测点 7 的 MAR 内, 最终将导致节点 8 的故障无法被监测到。然而监测点 12 的观测域中最大电压暂降值 0.78 p.u. 远小于监测点 13 的 0.89 p.u., 说明监测点 12 几乎不会因为实际暂降值的升高而无法监测到该点故障, 因此图 2(b) 中的方案更加可靠。在本文所提出方法中将根据各个监测点 MRA 内的电压暂降幅值对监测点进行评估, 并通过目标函数的重新建立, 实现配置方案的自主选择。

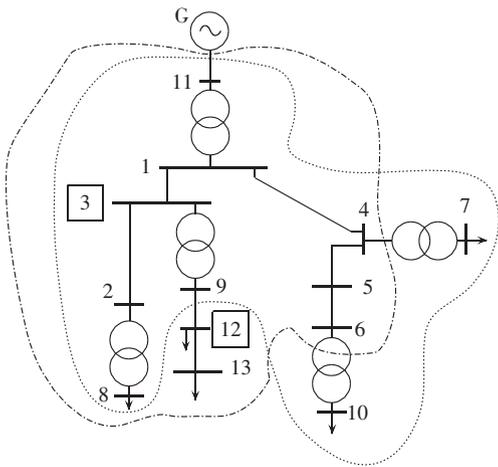
2.2 模糊边界可观测域建立

本文用一种模糊阈值来替代传统的严格阈值。某监测点的 MRA 如图 3 所示, 图 3 中严格的边界仅仅指出了哪些故障点在该母线的观测范围内, 而图 4 中的模糊阈值不仅给出了监测点的 MRA 还给出了该区域内故障点的影响程度。



--- 监测点 7 的 MRA
 监测点 13 的 MRA

(a) 方案 1: 监测装置安装在节点 7 和 13



--- 监测点 12 的 MRA
 监测点 3 的 MRA

(b) 方案 2: 监测装置安装在节点 3 和 12

图 2 不同的监测点分布方案

Fig.2 Different monitoring point arrangements

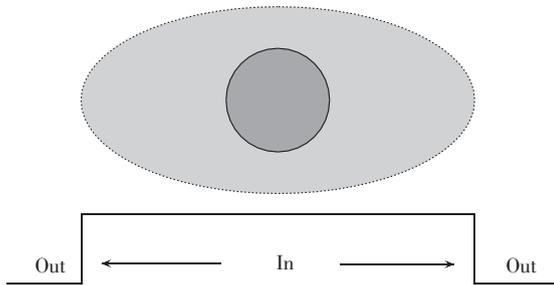


图 3 严格阈值

Fig.3 Strict threshold

基于模糊阈值建立的模糊电压暂降可观测区域称为 MMRA。每种故障建立一个对应的 MMRA。MRA 是有明确边界划分的,只有 2 个部分,元素值为 0 或 1。而 MMRA 有 3 个部分,为 I (In)、 B (Boundaries) 和 O (Out),其中 In 是完全在监测区域的故障点, Boundaries 是在模糊阈值区域的故障点, Out 包括监

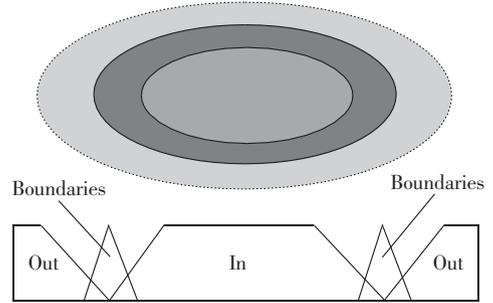


图 4 模糊阈值

Fig.4 Fuzzy threshold

测区域之外以及高于传统阈值的点。

为了说明模糊阈值的含义,上述 14 节点系统的监测点 13 的 MMRA 如图 5 所示。图中的区域 1 是监测点 13 明确的 MRA,区域 1 内故障点引起的监测点 13 的电压暂降值小于等于 $0.8p.u.$;区域 2 则是模糊边界域,区域 2 内故障点引起监测点 13 的电压暂降值范围为 $0.8\sim 0.9p.u.$ 。

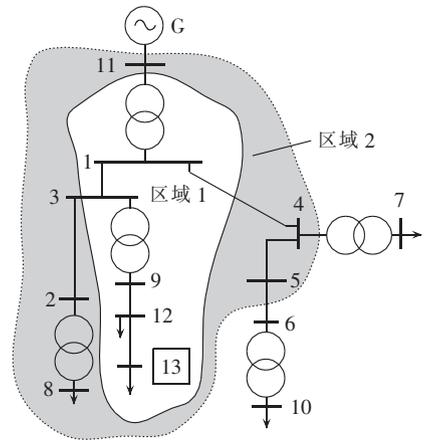


图 5 监测点 13 的模糊可观测区域

Fig.5 MMRA of monitoring point No.13

3 优化模型的建立和算法实现

3.1 目标函数

传统的优化配置方法中通常通过监测点的数量来对比配置结果,没有考虑监测点的观测能力。本文通过运用 MMRA,引入监测点观测指数 D 表示监测点的观测能力。 D 的大小由 MRA 内最小的电压暂降值、MRA 内电压暂降平均值和 MRA 内最大的电压暂降值决定。

由 2.1 节的分析可知,MRA 内的电压暂降值越低,该观测点越可靠,受外界干扰越小。因此,监测点的 D 越小,该点观测能力越好,越不容易忽视导致暂降幅值较大的故障点。

通过建立 Mamdani 模糊模型^[14]计算得到每条母线(候选监测点)的 D 。一般情况下,监测点发生故障时所能检测到的最小电压暂降幅值均为 0(假设故障发生在监测点时接地电阻为 0),因此,本文中考虑

电压暂降幅值最大值 U_{\max} 和电压暂降平均值 U_{ave} 作为输入变量,输出变量就是该监测点的观测指数 D 。

为了使输入输出量模糊化,本文中输入变量电压幅值最大值 U_{\max} 和平均值 U_{ave} 的模糊集采用 MMRA 中的集合分布: $\{I(\text{In}), B(\text{Boundaries}), O(\text{Out})\}$; 输出变量 D 的模糊集采用 $\{TB(\text{真大}), WB(\text{弱大}), M(\text{中等}), WS(\text{弱小}), TS(\text{真小})\}$ 。输入和输出的隶属度函数分别如图 6、7 所示,模糊规则表如表 1 所示。

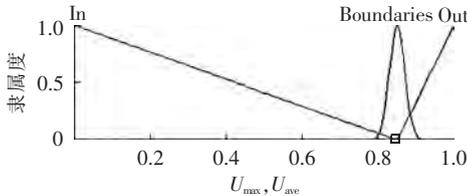


图 6 电压幅值最大值和平均值的隶属度函数
Fig.6 Membership function of maximum and average voltage amplitudes

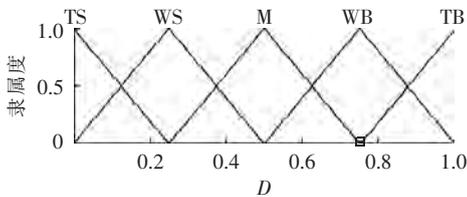


图 7 观测指数的隶属度函数
Fig.7 Membership function of observation index

表 1 模糊控制规则表
Table 1 Fuzzy control rules

U_{ave} 模糊集	U_{\max} 模糊集		
	I	B	O
I	TS	WS	M
B	WS	M	WB
O	M	WB	TB

上述模型是基于单一故障类型下建立的,综合考虑各种故障,取某母线在 4 种故障类型的模型下得到的 D 的平均值,即可得到该母线的综合观测指数 D_{gr} ,且 D_{gr} 越小,表示该母线 MRA 内的整体电压暂降值越低,则监测能力越好。

Sugeno 模型^[15]能够用较少的规则数描述给定的未知系统,而且其结论部分采用线性模型描述,这使复杂的输入以线性关系输出,因而本文用它来建立目标函数。以监测点个数为输入变量个数,观测指数为变量值,输出为各监测点观测指数的线性函数。该模型可以由 1 组 If-Then 的模糊规则来表述,每条规则代表 1 个线性子系统。假设共有 K 条模糊控制规则,其中第 k 条规则 R^k 可表述为:

$$R^k: \text{if } D_{g1} \text{ is } A_1^k \text{ and } D_{g2} \text{ is } A_2^k, \dots, D_{gm} \text{ is } A_m^k$$

$$\text{Then } y^k = a_0^k + a_1^k D_{g1} + \dots + a_m^k D_{gm}$$

模糊系统的输出量为每条规则的输出量的加权平均:

$$\hat{y} = \frac{\sum_{k=1}^K \omega^k y^k}{\sum_{k=1}^K \omega^k} \quad (12)$$

$$\omega^k = \min_{j=1}^n A_j^k(x_j)$$

其中, K 为规则数目; n 为输入变量个数; $D_g = [D_{g1}, D_{g2}, \dots, D_{gn}]$ 为 n 维的输入向量; \hat{y} 为系统输出。

输入变量各母线观测指数的模糊集采用 $\{B(\text{大}), M(\text{中}), S(\text{小})\}$, 输入隶属度函数如图 8 所示。

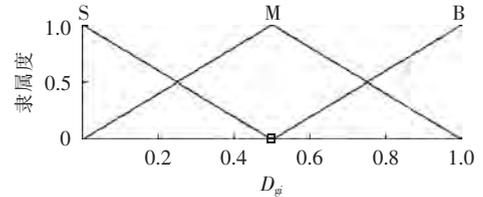


图 8 母线综合观测指数的隶属度函数
Fig.8 Membership function of comprehensive observation index for bus

通过模糊控制系统的输出函数,可构造在系统有 n 个监测点时的优化目标函数为:

$$f = \min(\hat{y}n) \quad (13)$$

该目标函数为 2 项相乘的复合函数,可以同时反映当前配置方案的监测点个数和方案的好坏程度。从函数中可以看出,即使在监测点个数相同的情况下,不同配置的目标函数也不相同,而且目标函数越小该方案越好,从而可以得到最优方案。

3.2 约束条件

为了保证在任意故障类型下每个故障至少能被 1 个监测点观测到,建立全局可观测矩阵:

$$M = [M_{3p}, M_{1p}, M_{2p}, M_{2pg}]$$

其中, $3p$ 、 $1p$ 、 $2p$ 和 $2pg$ 分别表示三相短路、单相短路、两相短路和两相接地短路故障。

则该优化问题应满足以下约束条件:

$$\sum_{i=1}^N x_i M(i, j) \geq 1 \quad \forall j = 1, 2, \dots, 4F \quad (14)$$

其中, N 为系统母线总数; F 为故障点数。

3.3 基于 BPSO 算法的优化配置

电压暂降监测装置优化配置问题属于典型的离散型、非线性问题。与已有的优化设计模型,如整数线性规划法、遗传算法等相比,粒子群优化算法具有依赖的经验参数少、收敛速度快等优点,但是基本粒子群算法是解决连续性问题的有效方法,不适用于离散问题,因此,本文应用 BPSO 算法进行优化。

BPSO 算法^[13]最早由 Kennedy 和 Eberhart 在基本粒子群优化算法的基础上提出,该方法使得粒子群优化算法能够更好地解决离散组合优化问题。

BPSO 算法中,粒子向量变为由 0 和 1 组成的二进制字符串,即粒子位置的搜索空间变为 n 维二进制空间。其速度的更新方法与基本粒子群优化算法相同,而位置更新公式变为:

$$x_{ij}(d+1) = \begin{cases} 0 & \text{其他} \\ 1 & \rho < s[v_{ij}(d+1)] \end{cases} \quad (15)$$

$$s[v_{ij}(d+1)] = \frac{1}{1 + \exp[-v_{ij}(d+1)]} \quad (16)$$

其中, $d+1$ 为当前的迭代次数; ρ 为 0~1 的随机数; $v_{ij}(d+1)$ 为本次迭代中更新后的速度。

由此可见, 参数 s 在 0~1 间取值的概率取决于粒子速度的大小; 若 s 的值接近于 1, 则 $s > \rho$ 的概率也就越大, 其粒子将更可能被选择为 1; 反之, 若 s 接近于 0, 则粒子的位置更可能被选择为 0。

为了避免 BPSO 算法易陷入局部最优的缺陷, 本文引入自适应惯性权重。小的惯性因子 ω' 有利于延缓收敛速度, 不会出现振荡现象, 但是小的惯性因子将缩小搜索空间, 容易陷入局部最优; 而大的惯性因子可以使粒子的速度增大, 增强全局的搜索能力, 但容易导致过早收敛。因此, 本优化问题中采用一种自适应权重选择法:

$$\omega^* = \begin{cases} \min \omega' + \frac{(f_k - g_{id})(\max \omega' - \min \omega')}{f_{avg} - g_{kd}} & f_k \leq f_{avg} \\ \max \omega' & f_k > f_{avg} \end{cases} \quad (17)$$

其中, $\min \omega'$ 、 $\max \omega'$ 分别为惯性权重 ω' 的下限和上限值, 一般取值在 (0, 1) 之间; f_k 为第 k 个粒子当前的适应度值; g_{kd} 为当前全局最优值; f_{avg} 为所有个体适应度值的平均值。

BPSO 算法中以式 (9) 给出的 N 维向量 X 为状态变量, 即粒子群中每个粒子为一个二进制表示的 N 维向量, 每个粒子表示一种配置方案。

本文所提出的电压暂降监测点优化配置流程图 9 所示。

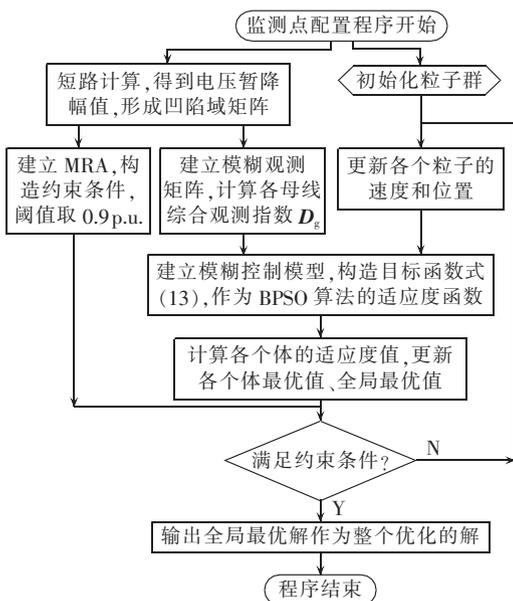


图 9 电压暂降监测点优化配置流程图
Fig.9 Flowchart of optimal voltage-sag monitors allocation

4 算例分析

本文对 IEEE 30 节点系统进行电压暂降监测点的优化配置, IEEE 30 节点系统接线图如图 10 所示, 该系统包括 6 个电源、4 台变压器、30 条母线以及 37 条输电线路。

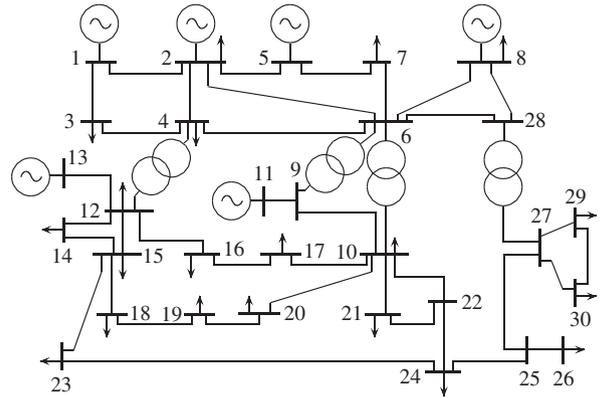


图 10 IEEE 30 节点系统接线图
Fig.10 Wiring diagram of IEEE 30-bus system

在电压暂降幅值计算中不能忽略发电机阻抗对短路分析的影响, 发电机阻抗通过发电机出力和节点负载计算得到。为了保证优化配置的精度, 在每条线路上以等间距取 5 个故障点作为虚拟故障点。监测装置候选安装点为系统内 30 条母线。

在 MATLAB 环境下对该系统进行仿真, BPSO 算法中初始种群设为 30, 最大迭代次数为 200 次。

IEEE 30 节点系统各母线监测指数如表 2 所示, 最佳的 5 个配置方案如表 3 所示。

从表 3 可以看出, 5 个最佳配置方案的监测点个数并不完全相同, 前 3 个方案只需要安装 2 个监测装置, 后 2 个方案需要 3 个监测装置。另外, 前 3 个方案只有 1 个监测点是不同的, 即母线 7、母线 5 和母线 6, 从表 2 中可以看出, 母线 7、母线 5 和母线 6 的观测指数分别为 0.3650、0.4195 和 0.4218, 因此, 母线 7 具有更好的观测能力, 方案 1 的目标函数值 (即每个粒子的适应度值) 也更小, 方案 1 为最优方案。

表 2 系统各母线综合监测指数
Table 2 Comprehensive observation index of buses

母线	D_{θ}	母线	D_{θ}	母线	D_{θ}
1	0.3546	11	0.1731	21	0.4424
2	0.4061	12	0.4434	22	0.4353
3	0.4503	13	0.1475	23	0.4122
4	0.4146	14	0.4304	24	0.4433
5	0.4195	15	0.4334	25	0.4194
6	0.4218	16	0.3885	26	0.3893
7	0.3650	17	0.4212	27	0.4354
8	0.4364	18	0.4297	28	0.4095
9	0.4391	19	0.4498	29	0.4345
10	0.4223	20	0.4346	30	0.4145

表 3 采用本文方法的监测点最优配置结果
Table 3 Optimal allocation of monitoring points by proposed method

排序	监测点个数	监测点	目标函数值	\hat{y}
1	2	母线 7, 母线 26	2.6480	1.3240
2	2	母线 5, 母线 26	2.7200	1.3600
3	2	母线 6, 母线 26	2.7831	1.3916
4	3	母线 7, 母线 13, 母线 26	3.6880	1.2293
5	3	母线 7, 母线 24, 母线 27	4.1671	1.3890

为了直观地比较方案 1 和方案 2, 图 11 给出了 2 个方案中不同监测点母线 7 和母线 5 在三相短路故障下(由于 MRA 是在同一故障类型下形成的)的 MMRA。

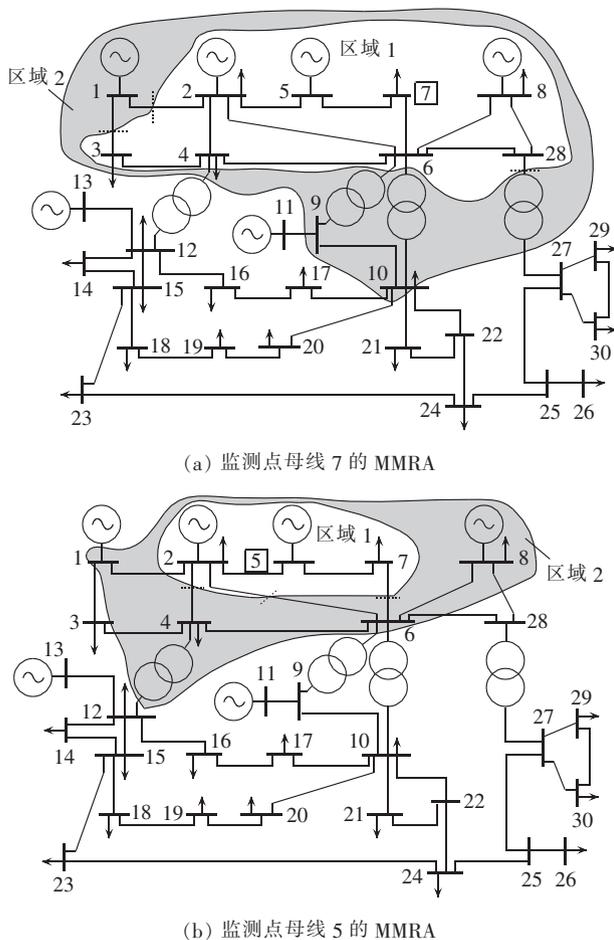


图 11 不同监测点在三相短路故障下的模糊可观测区域
Fig.11 MMRA of different monitoring points during three-phase short circuit fault

图 11(a) 和图 11(b) 所示分别为监测点母线 7 和母线 5 的 MMRA。图中各区域含义与图 5 中相同, 区域 1 内故障点引起监测点母线的电压暂降值小于等于 0.8p.u. ; 区域 2 是模糊边界域, 该区域内故障点引起监测点母线的电压暂降值范围为 $0.8\sim 0.9\text{p.u.}$ 。从两图对比可以看出, 图 11(a) 中分布于区域 1 的故障点明显多于图 11(b), 具体故障点分布情况和电压暂降幅值信息如表 4 所示, 表中电压均为标么值。

从表 4 可以看出, 监测点母线 7 的 MMRA 内引

表 4 三相短路故障时监测点母线 7 和母线 5 可观测区域内故障点分布和电压暂降特征量信息

Table 4 Fault point distribution and voltage-sag characteristics in MRA of monitoring point Bus 7 and Bus 5 during three-phase short circuit fault

监测点	U_{\max}	U_{ave}	故障点(包括虚拟故障点)	
			区域 1	区域 2
母线 7	0.8657	0.6318	62	18
母线 5	0.8981	0.7501	18	40

起电压暂降的平均值较母线 5 的平均值小 1.183p.u. , 最大值也比母线 5 小。从 MRA 内引起暂降的故障点数量来看, 监测点母线 7 在区域 1 内的故障点为 62 个(包括母线和线路上虚拟故障点), 远远多于母线 5 的 18 个, 即母线 7 的 MRA 内引起其电压暂降小于等于 0.8p.u. 的点集中并且数量很多, 这些故障点易被监测, 不容易被忽视; 而监测点母线 7 在区域 2 内的故障点明显少于母线 5, 即模糊边界内大于 0.8p.u. 的点较少, 产生误判的机会也相对减少。根据 2.1 节的分析可知, 监测装置安装在母线 7 较母线 5 有明显的优势。

此外, 从表 3 中 Sugeno 模糊控制模型的输出值 \hat{y} 可以看出, 各个方案监测力度并不一定与监测点个数成正比。如方案 1 和方案 4 配置的监测点个数分别为 2 个和 3 个, 而 \hat{y} 分别为 1.3240 和 1.2293, 即虽然方案 1 比方案 4 少了 1 个监测点, 但方案 4 整体的监测效果比方案 1 要可靠。因此, 在资金允许的情况下, 方案 4 可以优先考虑。

5 结论

本文将模糊控制模型应用到电压暂降监测点优化配置中, 充分运用了电压暂降特征值信息, 提出了模糊阈值和观测能力指数的概念, 并且应用适用于离散问题的 BPSO 算法实现了优化配置。通过对 IEEE 30 节点标准测试系统的仿真计算以及对结果的分析表明, 与传统方法相比, 所提出方法对阈值依赖小, 并且能够给出配置方案的排序, 对于最终的配置方案确定提供了重要依据。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.

- [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):107-117.
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):107-117.
- [4] BOLLEN M H J. Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions[M]. New York,USA:IEEE Press,2000.
- [5] 肖湘宁,韩民晓,徐永海,等. 电能质量分析与控制[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [6] 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 part 3:voltage sags in power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(12):1-4.
- [7] OLGUIN G,VUINOVICH F,BOLLEN M H J. An optimal monitoring program for obtaining voltage sag system indexes[J]. IEEE Trans on Power Systems,2006,21(1):378-383.
- [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] ESPINOSA-JUAREZ E,HERNANDEZ A,OLGUIN G. An approach based on analytical expressions for optimal location of voltage sags monitors[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2009,24(4):2034-2042.
- [10] ALMEIDA C F M,KAGAN N. Using genetic algorithms and fuzzy programming to monitor voltage sags and swells[J]. IEEE Computer Society,2011,26(2):1541-1672.
- [11] 谭丹,杨洪耕. 基于故障识别法的电压暂降监测点的优化配置[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(20):7-12.
TAN Dan,YANG Honggeng. An optimum allocation of voltage sag monitor based on fault recognition method [J]. Power System Protection and Control,2013,41(20):7-12.
- [12] 陈礼频,肖先勇,张文海. 考虑扰动源定位的电压暂降监测点最优配置[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):79-84.
CHEN Lipin,XIAO Xianyong,ZHANG Wenhai. Optimal allocation of voltage sag monitors considering disturbance-source locating [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):79-84.
- [13] 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.
- [14] 周泰斌,周建中,常黎. 模糊控制在水轮机调节系统中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报,2003,15(1):10-14,81.
ZHOU Taibin,ZHOU Jianzhong,CHANG Li. The application of fuzzy control in the hydraulic turbine regulating system [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA,2003,15(1):10-14,81.
- [15] SUGENO M,KANG G T. Structure identification of fuzzy model [J]. Fuzzy Sets and Systems,1988,28(1):1533.
- [16] KENNEDY J,EBERHART R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm [C]//1997 IEEE International Conference on Computational Cybernetics and Simulation. Orlando,FL,USA:IEEE,1997:4104-4108.

作者简介:



唐亚迪

唐亚迪(1989—),女,河南郑州人,硕士,主要研究方向为电能质量(E-mail:yaditang@126.com);

徐永海(1966—),男,河南新野人,教授,博士,从事新能源和电能质量分析与控制等方面的研究(E-mail:yonghaixu@263.net);

洪旺松(1988—),男,河北石家庄人,硕士,主要研究方向为电能质量(E-mail:hongwangsong_0127@163.com)。

Allocation optimization based on fuzzy control model for voltage-sag monitors

TANG Yadi,XU Yonghai,HONG Wangsong

(School of Electrical & Electronic Engineering,North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: A method of allocation optimization based on the fuzzy control model and the particle swarm algorithm is proposed for the voltage-sag monitors. The concept of fuzzy threshold and observation index are put forward to avoid the defects of the traditional method based on the MRA(Monitor Reach Area). A fuzzy control model considering the observation ability of monitoring points is established to construct the optimal objective function and the BPSO(Binary Particle Swarm Optimization) algorithm is applied to optimize the allocation of voltage-sag monitors. The proposed method is simulated and analyzed with IEEE 33-bus system and the optimized allocation is compared with that by the MRA-based method,which shows that,the complete voltage-sag observability of whole power grid and the optimal allocation of voltage-sag monitors are realized by the proposed method.

Key words: voltage sag; monitoring; optimization; fuzzy control; fuzzy threshold; observation index; BPSO algorithm; models