

考虑监测点建设紧迫性的电压暂降监测装置 多目标优化模型

周思宇¹, 韩 杨^{1,2}, 杨 平¹, 王丛岭¹, 张 逸³

(1. 电子科技大学 机械与电气工程学院, 四川 成都 610054;

2. 电子科技大学 广东电子信息工程研究院, 广东 东莞 523808;

3. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要:为了实现电压暂降监测装置更加精准的布局,确保电网的稳定运行,提出了一种考虑监测点建设紧迫性的电压暂降监测装置多目标优化模型。首先,引入电压暂降幅度和电压暂降频率状态评估指标,建立监测装置建设紧迫性评估模型;然后,综合考虑系统监测点的建设紧迫性,基于电压暂降可观测矩阵,建立最小化建设紧迫性总权重和最小化可观测损失率的多目标优化模型,并引入不满意度评估模型,建立改进帕累托最优前沿的计算模型,分析各相互冲突的目标之间的耦合关系;最后,以一个110 kV以上电压等级的实际输电网为算例,得到其最优布局方案,并与传统优化模型进行比较,证实了所提优化模型的正确性及其实际工程应用价值。

关键词:电压暂降;建设紧迫性;可观测损失率;多目标优化;帕累托最优前沿

中图分类号:TM 715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202112011

0 引言

随着电力用户的敏感设备不断增多,对现代电力系统的供电可靠性及电能质量提出了越来越高的要求,而在一系列电能质量问题中,电压暂降是电力系统中发生频率最高且影响工业生产最为主要的问题^[1]。通常将电力系统中某点的供电电压有效值下降至10%~90%,并短暂持续10 ms~1 min的现象称为电压暂降^[1-2]。研究表明,电压暂降给敏感工业用户造成了巨大的经济损失^[3]。因此,为了维护电力系统的供电可靠性及运行稳定性,建立一个监测全网电压波动情况的系统,保证社会生产活动的正常、有序进行,成为世界范围内亟待解决的问题。

然而,输电网络是一个庞大的系统,节点众多,拓扑结构错综复杂,在电力系统的每一个节点均安装电压暂降监测装置将耗费巨大的经济成本。因此,优化配置有限的监测装置,通过部分节点实现对全网电压暂降的监测是解决上述问题的关键^[4]。文献[4-6]计及不同因素对监测装置优化布局的影响,以监测装置建设数量最小为目标,建立了电压暂降监测装置的优化配置模型,得到了合理的布局方案,但均将优化模型考虑为单目标优化问题,而在实际

工程应用中,往往需要同时考虑投资成本、可观测范围和建设必要性等多个影响因素。因此,建立符合实际需求的多目标优化模型成为实现电能质量监测装置优化配置方法推广的必要途径。

多个目标之间往往是相互冲突的:增加装置的建设数量可以有效控制电压暂降的可观测范围,提升监测水平和准确度,但会增大投入成本,给电网公司带来沉重的经济负担;而减少装置的建设数量又会减小监测范围和监测冗余度,降低电网的运行可靠性。帕累托最优前沿POF(Pareto Optimal Front)思想能够有效解决多个目标相互冲突的问题,已被逐渐应用于电能质量监测装置的优化研究中。文献[7]通过求取POF找到了电能质量监测装置建设投资成本和可观测范围之间的耦合关系,并给出了不同应用场景下的具体优化布局方案;文献[8]考虑故障的对称性问题,建立了以故障可识别数量最大和监测装置建设数量最小为目标的多目标优化模型,并根据POF找到问题的最优解;文献[9]认为更高的监测冗余度可以有效提升电能质量监测的可靠性,提出了综合考虑最小化装置投资成本和最大化观测冗余度的多目标优化方法,并引入POF分析得到了监测装置的最优建设方案。但上述研究均认为全网监测点的建设需求是均匀的,并未考虑各节点监测装置的建设紧迫度,降低了优化方法的准确度。文献[10-11]引入权重系数用于表征各节点的重要程度,得到了更具针对性的监测装置优化方案,但权重的设置仅考虑了节点变压器的容量和电压等级,并未分析各节点的电压暂降水平;文献[12]考虑监测

收稿日期:2021-03-04;修回日期:2021-10-21

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(2018A030313494);
新能源电力系统国家重点实验室开放课题项目(LAPS18007)

Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province(2018A030313494) and the State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(LAPS18007)

点数量与估计误差之间的权衡问题,通过改进的密度偏差抽样法确定监测点数量,但该方法需要大量实测数据作为支撑,在未测得真实电网运行数据的情况下难以实现。

针对上述问题,本文提出了一种考虑各监测点建设紧迫性的电压暂降监测装置的多目标优化模型。首先,基于电压暂降信息,对电网各节点的电压暂降状态进行评估,建立监测装置建设紧迫性评估模型;然后,基于电压暂降可观测矩阵,建立最小化监测装置总建设权重和最小化全网可观测损失率的多目标优化模型,并采用改进POF求解方法分析2个目标之间的耦合关系;最后,以某市110 kV以上电压等级的实际输电网为算例,验证了所提优化模型的有效性,并与传统优化模型进行对比,证明所提优化模型的正确性与工程实践价值。

1 建设紧迫性评估模型

已有研究获得了真实电网场景下的电能质量信息数据,利用机器学习等智能算法对电网故障进行预测,实现对电能质量监测装置的优化布局^[13]。但受时间、人力和财力等因素的约束,获取电网实际运行情况下的电压暂降信息仍有巨大的障碍,为此本文采用已经被广泛应用于电压暂降监测装置优化布局问题中的故障点法,模拟得到电网各节点的电压暂降信息数据,计算电压暂降的各项评估指标,建立各节点监测装置的建设紧迫性评估模型。受限于篇幅,本文不再赘述故障点法的具体仿真步骤。

传统优化方法基于节点的变压器容量及电压等级评估各节点的权重^[10-11],如式(1)所示。

$$c_i = 1/S_i + 1/V_i \quad (1)$$

式中: c_i 为传统优化方法下节点*i*的建设权重; S_i 、 V_i 分别为节点*i*的变压器容量、电压等级。传统优化方法只是简单地从变压器配置容量的角度主观地认为容量更大的变压器节点更容易发生电压暂降,并未对各节点电压暂降的严重程度进行计算,而在实际电网的运行过程中,变压器容量及电压等级在一定程度上可以表明该节点的重要性,但并不能完全表征该节点受电压暂降影响的程度,无法确定实际电压暂降对该节点建设紧迫性的影响。通过对节点电压暂降幅度和电压暂降频率这2个指标进行评估,能够较为全面地反映各节点受系统故障影响的电压暂降水平和状态,更加精准地确定节点监测装置的建设紧迫性。

1.1 电压暂降幅度计算模型

电压暂降幅度表明了节点故障影响的电压暂降深度和电压暂降严重程度,计算公式为:

$$E_{\text{scope},i} = \frac{E_{\text{expected},i} - E_{\text{min},i}}{E_{\text{ref}} - E_{\text{min},i}} \quad i \in I \quad (2)$$

$$E_{\text{expected},i} = \sum_{j \in J} e_{i,j} / N_{\text{fault}} \quad (3)$$

$$E_{\text{min},i} = \min \{ e_{i,1}, e_{i,2}, \dots, e_{i,N_{\text{fault}}} \} \quad (4)$$

式中: $E_{\text{scope},i}$ 为节点*i*的电压暂降幅度; I 为系统节点集合; E_{ref} 为系统电压参考值,本文中取值为1 p.u.; $E_{\text{expected},i}$ 为节点*i*在电网所有故障下的电压暂降幅值期望值,衡量了节点*i*对系统故障的整体表现水平,其值越小表明节点*i*对系统所有故障的整体敏感程度越大; $E_{\text{min},i}$ 为系统所有故障下节点*i*的电压幅值最小值; $e_{i,j}$ 为故障*j*下节点*i*的电压幅值; J 为系统故障集合; N_{fault} 为系统故障总次数。由式(2)~(4)可知,节点受系统故障的影响越大,则电压暂降幅值越小,该节点的电压暂降幅度越大。

1.2 电压暂降频率计算模型

电压暂降幅度揭示了节点电压受系统故障影响的程度,能够较为准确地反映节点电压暂降的严重性。而电压暂降频率则反映了节点电压受系统故障影响的敏感程度,计算公式为:

$$F_{\text{vs},i} = \sum_{j \in J} f_{i,j} / N_{\text{fault}} \quad (5)$$

$$f_{i,j} = \begin{cases} 1 & e_{i,j} < E_{\text{threshold}} \\ 0 & e_{i,j} \geq E_{\text{threshold}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $F_{\text{vs},i}$ 为节点*i*的电压暂降频率; $E_{\text{threshold}}$ 为电压暂降阈值; $f_{i,j}$ 为0-1变量,当故障*j*下节点*i*的电压幅值小于电压暂降阈值时,表明故障*j*导致节点*i*发生电压暂降,则 $f_{i,j}=1$,当故障*j*下节点*i*的电压幅值不小于电压暂降阈值时,表明故障*j*未导致节点*i*发生电压暂降,则 $f_{i,j}=0$ 。

1.3 建设紧迫性评估模型

综合上述电压暂降幅度和电压暂降频率指标,能够较为全面地评估各节点的电压暂降严重性及电压暂降水平,从而得到各节点监测装置的建设紧迫性评估模型。电压暂降频率越大,表明电压暂降对系统故障越敏感,则相应节点配置监测装置的建设紧迫性越高;而电压暂降幅度越小,则相应节点配置监测装置的建设紧迫性越高。可见,2个指标的特性表征是相反的,为了避免冲突,根据式(7)和式(8)推导得到节点监测装置的建设紧迫性。

$$\max \{ F_{\text{vs},i} \} \rightarrow \min \{ 1 - F_{\text{vs},i} \} \quad (7)$$

$$w_i = \alpha E_{\text{scope},i} + (1 - \alpha)(1 - F_{\text{vs},i}) \quad (8)$$

式中: w_i 为节点*i*监测装置的建设紧迫性权重;由于并不能精准地确定电压暂降幅度与电压暂降频率对节点的影响程度,本文引入分配系数 α ,对2个指标进行权重分配,且有 $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

2 考虑建设紧迫性的多目标优化模型

2.1 电压暂降凹陷域

所谓凹陷域,是指当电力系统某处发生故障时,

使系统中所关心的某一节点负荷发生电压暂降,从而导致用电设备无法正常工作^[4]。以电压暂降阈值为 0.9 p.u. 为例,电压暂降凹陷域如附录 A 图 A1 所示。

在凹陷域内,各节点电压幅值低于电压暂降阈值,因此,电压暂降监测装置可以观测到系统电压暂降的发生,从而可以及时提示电网维护人员系统发生的故障,并进一步指导实现故障定位和故障清除;而在凹陷域外,由于节点电压幅值大于电压暂降阈值,电压暂降监测装置无法监测到系统发生电压暂降,使得故障无法被及时排除,从而影响企业和工厂设备的正常运行,造成巨大的经济损失,同时也给电网的稳定运行带来挑战。

结合电压暂降凹陷域的基本概念,以及电力系统对称故障和不对称故障的特点,可以建立电压暂降可观测矩阵。对于对称故障而言,系统的各相电压幅值相等,只需判断任意一相的电压幅值即可;而对于不对称故障而言,需要对三相电压分别进行判断。因此,定义可观测变量如式(9)所示^[4]。

$$M_{\varphi p, i, j} = \begin{cases} 1 & e_{\varphi p, i, j} < E_{\text{threshold}} \\ 0 & e_{\varphi p, i, j} \geq E_{\text{threshold}} \end{cases} \quad \varphi \in \{a, b, c\} \quad (9)$$

式中: $M_{\varphi p, i, j}$ 为 φ 相的可观测变量,其为 0-1 变量,表示故障 j 下节点 i 是否可观测,若故障 j 下节点 i 的 φ 相电压幅值 $e_{\varphi p, i, j}$ 小于电压暂降阈值,则表示该节点可观测, $M_{\varphi p, i, j} = 1$,否则表示该节点不可观测, $M_{\varphi p, i, j} = 0$ 。

因此,根据文献[4, 14]可推导对称与不对称故障下的电压暂降是否可观测,如式(10)和式(11)所示。

$$M_{i, j} = \begin{cases} 1 & e_{i, j} < E_{\text{threshold}} \\ 0 & e_{i, j} \geq E_{\text{threshold}} \end{cases} \quad (10)$$

$$e_{i, j} = \min_{\varphi \in \{a, b, c\}} \{e_{\varphi p, i, j}\} \quad (11)$$

式中: $M_{i, j}$ 表示故障 j 下节点 i 的电压暂降是否可观测,若故障 j 下节点 i 的电压幅值 $e_{i, j}$ 小于电压暂降阈值,则表示该节点可观测, $M_{i, j} = 1$,否则表示该节点不可观测, $M_{i, j} = 0$ 。对于不对称故障而言,若节点 i 电压幅值最小一相的电压幅值低于电压暂降阈值,则表示该节点的电压暂降可观测。

2.2 最小化可观测损失率

当系统发生故障,使得电网中某节点发生电压暂降且该节点处安装了电压暂降监测装置时,认为可在该节点处监测到引起电压暂降的故障,具体可表示为:

$$N_{MR, j} = \sum_{i \in I} x_i M_{i, j} \quad (12)$$

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 安装监测装置} \\ 0 & \text{节点 } i \text{ 未安装监测装置} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $N_{MR, j}$ 为故障 j 被监测到的次数; x_i 为 0-1 变量,

若节点 i 安装了监测装置则 $x_i = 1$,若节点 i 未安装监测装置则 $x_i = 0$ 。

大部分研究均是基于全网可观测的前提条件进行电能质量监测装置的优化布局,将可观测性看作一种约束条件^[15-17],但忽略了在工程实践中实现庞大的区域电网全网故障可观测,需要安装大量监测装置,会给电网公司带来沉重的经济负担问题。当初期投入资金不足时,上述布局方案在实际工程中实施相对较困难。因此,本文将电网故障可观测性作为优化目标^[7],最小化可观测损失率的目标函数如式(14)所示。

$$\min O_L = \left(1 - \sum_{j \in J} z_j / N_{\text{fault}}\right) \times 100 \% \quad (14)$$

$$z_j = \begin{cases} 1 & \text{故障 } j \text{ 被监测到} \\ 0 & \text{故障 } j \text{ 未被监测到} \end{cases} \quad (15)$$

约束条件为:

$$N_{MR, j} \geq z_j \quad (16)$$

式中: O_L 为可观测损失率; z_j 为 0-1 变量,若故障 j 被监测到则 $z_j = 1$,若故障 j 未被监测到则 $z_j = 0$ 。式(16)所示约束条件保证只要有 1 台监测装置能够监测到故障 j ,则 $z_j = 1$ 。

2.3 最小化建设紧迫性总权重

相比于传统优化模型以最小化监测装置布局数量为目标,本文考虑了实际过程中各节点的监测装置建设紧迫性,以最小化建设紧迫性总权重为目标函数,如式(17)所示。

$$\min W = \sum_{i \in I} w_i x_i \quad (17)$$

式中: W 为监测装置的建设紧迫性总权重。则监测装置布局数量 N_{device} 为:

$$N_{\text{device}} = \sum_{i \in I} x_i \quad (18)$$

3 多目标优化模型的求解

3.1 改进 POF 的优化步骤

当 2 个目标函数之间相互冲突时,不断改进任意一个目标函数,必然会削弱另一个目标函数的解。例如:建设紧迫性总权重减小,将导致监测装置数量随之减小,但监测装置数量减小将增大可观测损失率,使部分故障无法被监测到;相反地,可观测损失率减小意味着需要建设更多的监测装置,这会增大电网公司的投资成本,造成沉重的经济负担。在解决该类相互冲突的多目标优化问题时,可引入 POF 进行诠释。

POF 是指通过不断改进一个目标函数,并计算得到另一个目标函数的值,所形成的解集在空间上形成的曲线,如图 1 所示。图中, f_1 、 f_2 为 2 个目标函数的解。在理想状态下,期望 2 个目标函数均能够

达到点C,但在实际情况下2个目标函数相互影响,当一个目标函数达到理想解时,另一个目标函数的解必然减小,所以点C处的“理想最优解”被映射为POF上的点A和点B处。因此,本文通过求取POF,找到所提优化模型中2个相互冲突目标函数之间的耦合关系,并根据实际工程需求,给出相应的监测装置布局方案。

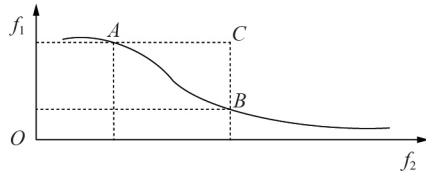


图1 POF示意图

Fig.1 Schematic diagram of POF

本文所提优化模型考虑了多个电压暂降水平评估指标,需对不同指标的分配系数进行系统分析,因此,基于文献[7]所述求取多目标优化问题的POF方法,本文引入不满意度评估模型^[7]及平均不满意度评估指标,建立基于改进POF的多目标优化模型,求解流程图见附录A图A2,具体求解步骤如下。

步骤1:为了避免主观确定分配系数所带来的误差和盲目性,需对不同分配系数下的优化结果进行讨论,为此,首先初始化电压暂降监测点建设紧迫性指标的分配系数 $\alpha_k(k=1, 2, \dots, K; K$ 为分配系数的数量)。

步骤2:当分配系数为 α_k 时,仅以最小化监测装置建设紧迫性总权重为目标,以可观测损失率 $O_L=0$ 为约束条件,建立优化模型并进行求解,得到相应的解 W_{\min}^1 ,该解为所允许的监测装置建设紧迫性总权重的最大值 W_{\max} ,即 $W_{\max} = W_{\min}^1$ 。

步骤3:以最小化可观测损失率为目标,以监测装置建设紧迫性总权重 $W \leq W_{\max}$ 为约束条件,建立优化模型并进行求解。

步骤4:重复步骤2的计算,并设置监测装置建设紧迫性总权重 W 从最小值0开始,以步长 δ 不断增大,直至达到最大值 W_{\max} 。

步骤5:根据步骤2—4的优化计算,得到可观测损失率 O_L 在不同监测装置建设紧迫性总权重 W 约束条件下的结果,并生成POF曲线。

步骤6:判断是否已经得到所有分配系数 α_k 下的POF曲线,若是,则转至步骤7;否则,返回步骤1,更新分配系数 α_k 。

步骤7:建立不满意度评估模型及平均不满意度评估指标,对POF解集进行评估,比较各POF并输出最佳方案。

3.2 不满意度评估模型

本文引入不满意度评估模型对各分配系数下的

POF曲线进行量化评估,避免所提考虑监测点建设紧迫性的优化模型在设置分配系数时的主观性。对目标函数的解进行归一化处理,并求解各归一化目标函数解与“理想最优解”的距离,描述各个解的相对不满意度。不满意度评估模型为:

$$S_{\text{nor},q} = \sqrt{(O_{L,\text{nor},q} - O_{L,\text{ideal}})^2 + (W_{\text{nor},q} - W_{\text{ideal}})^2} \quad (19)$$

$$O_{L,\text{nor},q} = \frac{O_{L,q} - O_{L,\text{min}}}{O_{L,\text{max}} - O_{L,\text{min}}} \quad (20)$$

$$W_{\text{nor},q} = \frac{W_q - W_{\text{min}}}{W_{\text{max}} - W_{\text{min}}} \quad (21)$$

式中: $S_{\text{nor},q}$ 为2个目标函数第 q 个解的相对不满意度; $O_{L,\text{nor},q}$ 、 $W_{\text{nor},q}$ 分别为POF曲线上第 q 个解的归一化可观测损失率、建设紧迫性总权重; $O_{L,\text{ideal}}$ 、 W_{ideal} 分别为“理想最优解”对应的归一化可观测损失率、建设紧迫性总权重; $O_{L,q}$ 、 W_q 分别为第 q 个解对应的可观测损失率、建设紧迫性总权重; $O_{L,\text{max}}$ 、 $O_{L,\text{min}}$ 分别为POF曲线上可观测损失率的最大值、最小值; W_{min} 为建设紧迫性总权重的最小值。根据POF解集的相对不满意度值,可求得平均不满意度评估指标,从而实现对整个方案的评估,如式(22)所示。

$$S_{\text{ave}}^k = \sum_{q=1}^{N_Q} S_{\text{nor},q}^k / N_Q \quad (22)$$

式中: S_{ave}^k 为第 k 条POF曲线的平均不满意度值; $S_{\text{nor},q}^k$ 为第 k 条POF曲线上第 q 个解的不满意度值; N_Q 为POF解集中解的个数。根据平均不满意度评估指标,可以确定不同分配系数所得POF的优劣程度。

3.3 优化求解方法

本文所提多目标优化模型是一个混合整数非线性问题,采用通用代数建模系统GAMS(General Algebraic Modeling System)软件实现模型的求解,该软件是一款求解大型数学规划问题的高级建模软件,目前已在电力系统的优化调度^[18]以及扩展规划^[19]研究中得到较为广泛的应用。在GAMS中调用分枝削减最优导航BARON(Branch-And-Reduce Optimization Navigator)求解器对优化问题进行求解,BARON求解器利用分枝定界算法寻求整体最优解,结合内点法(IPOPT)等非线性规划求解器和CPLEX等线性求解器求解子问题,求解无需设置初始点,且可以预设混合整数非线性优化终止误差容忍度范围^[20]。

4 算例分析

4.1 参数设置

相比现有大多文献采用IEEE测试系统进行算例分析,本文采用实际区域电网作为算例对所提优化模型进行验证,具有更大的工程实践价值。测试算例为四川省某市110 kV以上电压等级输电网,选

取其中的 170 个敏感负荷节点,该输电网共包含 386 条线路。由于实际电网线路过于复杂,为了便于观察,本文对电网拓扑结构进行适当简化,忽略非重点监测节点的连接关系,仅展示 170 个敏感负荷节点之间的连接方式,如附录 A 图 A3 所示。

利用 C++Builder 在电力系统分析软件 PSD-BPA (Power System Department-Bonneville Power Administration)^[21] 中进行故障卡替换,并将电压暂降数据导入 GAMS 中。所设故障类型包含单相接地短路故障、两相接地短路故障、两相短路故障和三相短路故障 4 种,由于电网中 80% 以上电压暂降都由线路故障产生,本文将故障位置设置在传输线路的 33.3%、50%、66.7% 这 3 处,故障总数为 4 632 个,电压暂降阈值 $E_{\text{threshold}}=0.9$ p.u.。值得注意的是,当可观测损失率为 0 时,意味着所有故障都至少能被 1 台装置监测到,即满足式(23)所示约束条件^[2],若此时某一故障下所有节点的电压幅值均未小于电压暂降阈值,则会与式(23)所示约束条件冲突,导致整个优化过程的可观测损失率计算出现偏差,因此在进行优化计算时,需将这部分未造成任意节点电压暂降的故障剔除(如式(24)、(25)所示),采用 GAMS 中经典的条件赋值语句可以快速实现。

$$M_{i,j}x_i \geq 1 \quad (23)$$

$$\varepsilon_{\min}^j = \min \{ e_{1,j}, e_{2,j}, \dots, e_{i,N_{\text{fault}}} \} \quad (24)$$

$$p_j = \begin{cases} 1 & \varepsilon_{\min}^j < E_{\text{threshold}} \\ 0 & \varepsilon_{\min}^j \geq E_{\text{threshold}} \end{cases} \quad (25)$$

式中: ε_{\min}^j 为故障 j 下所有节点的最小电压幅值; p_j 为 0-1 变量,若故障 j 被保留则 $p_j=1$,若故障 j 被剔除则 $p_j=0$ 。进行故障剔除后,实际参与优化计算的故障数量为 4 623 个。优化终止误差越小,则求解精度越高,但计算耗时越长,本文设 BARON 求解器的绝对终止误差容忍度为 7×10^{-7} ,相对终止误差容忍度为 0.1。本文所有计算均在 Dell 台式计算机上进行,配置为 Intel Core i5-10400, CPU 2.9 GHz, RAM 16 GB。

4.2 结果分析

首先选取分配系数 $\alpha=0.1$ 进行多目标优化,优化所得 POF 曲线如图 2 所示,随着建设紧迫性总权重增加,可观测损失率减小,且逐渐减小至 0,实现全网故障可观测。图中:点 a 处的监测装置布局数量为 0,建设紧迫性总权重为 0,由于没有布设监测装置,此时的可观测损失率为 100%;点 b 处的监测装置布局数量达到 53 台,建设紧迫性总权重为 44.755,可观测损失率为 0,实现了全网故障可观测,当电网公司拥有充足资金时,可以选用该布局方案建设监测装置,实现所有电压暂降故障的实时监测,最大限度地保证电网稳定、安全运行;点 c 为期望达

到的“理想最优解”,即监测装置布局数量为 0,同时可观测损失率为 0,但是在实际工程中无法实现在不建设监测装置的同时保证全网故障可监测。因此,当电网公司初期投入资金有限时,需要综合考虑 2 个目标,找到平衡 2 个相互冲突目标之间的折中方案,此时需要在 POF 曲线上搜寻“实际最优平衡解”。

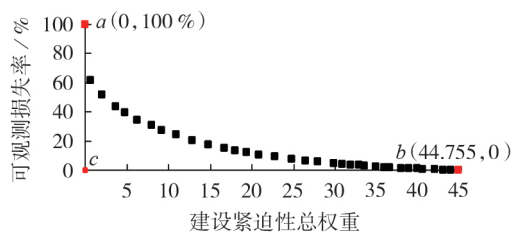


图 2 分配系数 $\alpha=0.1$ 时的 POF 曲线

Fig.2 POF curve when distribution coefficient $\alpha=0.1$

通过求解 POF 曲线上所有解的不满意度,可以得到解集中各解与“理想最优解”的相对距离,从而得到最接近“理想最优解”的“实际最优平衡解”,如图 3 所示。由图可知,在点 d 处取得不满意度最小值,该点即为“实际最优平衡解”,点 d 的相对不满意度为 0.344,归一化建设紧迫性总权重为 0.205,归一化可观测损失率为 27.6%,监测装置布局数量为 11 台。

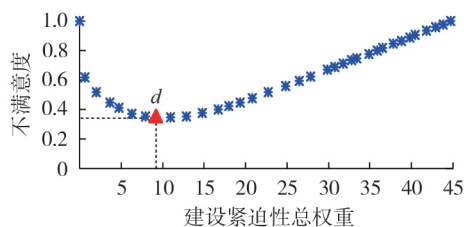


图 3 最优解的不满意度

Fig.3 Dissatisfactory degree of optimal solutions

根据不满意度评估模型确定建设紧迫性评估模型中电压暂降幅度与电压暂降频率的最佳配比,得到监测装置的最优布局方案。各分配系数下的不满意度分布如图 4 所示。由图可知:虽然因设置了终止误差,出现前、后 2 个解的值相同的情况,但可以看出任意分配系数下的不满意度均有相同的变化趋势;随着分配系数 α 变化,POF 解集中各解的不满意度也发生变化,当 $\alpha=0.1$ 时,“实际最优平衡解”的不满意度、可观测损失率分别为 0.344、27.6%,此时的监测装置布局数量为 11 台;当 $\alpha=0.3$ 时,“实际最优平衡解”的不满意度、可观测损失率分别为 0.345、24.0%,此时的监测装置布局数量为 13 台;当 $\alpha=0.5$ 时,“实际最优平衡解”的不满意度、可观测损失率分别为 0.341、23.6%,此时的监测装置布局数量为 13 台;当 $\alpha=0.7$ 时,“实际最优平衡解”的不满意度、可观测损失率分别为 0.340、23.6%,此时的监测装置布局数量为 13 台;当 $\alpha=0.9$ 时,“实际最优平衡解”的

不满意度、可观测损失率分别为0.344、27.6%，此时的监测装置布局数量为11台。可见，当 $\alpha=0.7$ 时“实际最优平衡解”的不满意度和可观测损失率分别取得最小值，但此时的监测装置布局数量为13台，相比布局11台增大了投资成本，而可观测损失率减小较少。根据POF解集的平均不满意度，可以从全局角度选取最佳分配系数，如表1所示。由表可知，当 $\alpha=0.9$ 时，布局方案有最小平均不满意度值0.596。因此，分配系数 $\alpha=0.9$ 为电压暂降幅度与电压暂降频率的最佳配比，在后续进行深入分析时，选取分配系数 $\alpha=0.9$ 的结果进行讨论。

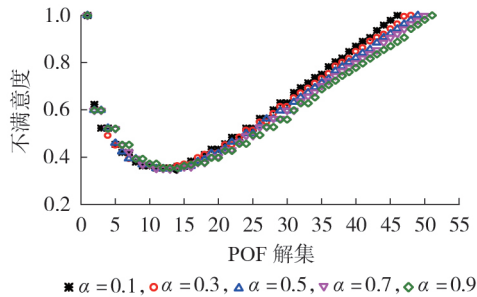


图4 不同分配系数下POF解集的不满意度

Fig.4 Dissatisfactory degrees of POF solution sets under different distribution coefficients

表1 不同分配系数下的平均不满意度

Table 1 Average dissatisfactory degrees under different distribution coefficients

α	平均不满意度	α	平均不满意度	α	平均不满意度
0.1	0.597	0.5	0.599	0.9	0.596
0.3	0.603	0.7	0.598		

进一步，对本文优化模型与传统优化模型的结果进行对比分析。传统优化模型采用文献[7]中的模型，忽略电网各节点的建设紧迫性权重，仅以最小化可观测损失率及监测装置布局数量为目标，采用BARON求解器进行求解。由于传统优化模型忽略了建设紧迫性，为了便于对比，本文将传统优化模型的布局位置映射至建设紧迫性权重分布图中，如图5所示。本文优化模型(分配系数 $\alpha=0.9$)和传统优化模型“实际最优平衡解”的具体布局方案如表2所示。

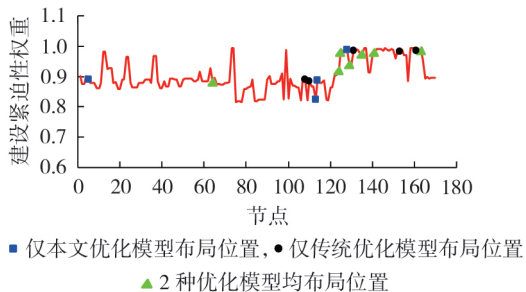


图5 监测节点建设紧迫性分布

Fig.5 Construction urgency distribution of monitoring nodes

表2 2种模型的监测装置布局位置对比

Table 2 Comparison of monitoring devices' layout positions between two models

优化模型	监测装置布局节点
本文优化模型($\alpha=0.9$)	5, 64, 113, 114, 124, 125, 128, 129, 135, 141, 163
传统优化模型	64, 108, 110, 124, 125, 129, 131, 135, 141, 153, 161, 163

由图5和表2可知，相比于传统优化模型，本文模型考虑了建设紧迫性，监测装置布局位置发生了变化，均布设在建设紧迫性权重取值更小的节点(即具有更高建设紧迫性的节点)，表明考虑建设紧迫性对布局方案具有明显的影响。

引入投入产出比模型对本文优化模型(分配系数 $\alpha=0.9$)与传统优化模型进行经济效益对比分析。电压暂降监测装置的投资成本为固定值，因此装置的布局数量可以直接表征建设投资成本，而其产出可用可观测范围表征，则投入产出比指标 C_{in-out} 如式(26)所示。

$$C_{in-out} = N_{device} / (1 - O_L) \quad (26)$$

投入产出比指标值越小，表明获得单位收益所需投资成本越小，则布局方案的经济效益越好。根据式(26)计算得到最优布局方案的 C_{in-out} ，如表3所示。由表可知：本文优化模型最优布局方案的监测装置布局数量更少，虽然可观测损失率有所上升，但忽略了建设紧迫性的传统优化模型增加了1台监测装置，可观测损失率仅减小2.2%，投入产出比却增加了5.9%，证明本文优化模型具有更好的经济性。本文优化模型最优布局方案的示意图如附录A图A4所示。

表3 最优布局方案对比

Table 3 Comparison of optimal layout schemes

优化模型	监测装置布局台数	可观测损失率/%	C_{in-out}
本文优化模型($\alpha=0.9$)	11	27.6	0.152
传统优化模型	12	25.4	0.161

5 结论

本文通过计算各项电压暂降评估指标，建立了监测点建设紧迫性评估模型，并将该模型引入目标函数中，基于电压暂降可观测矩阵，建立了最小化建设紧迫性总权重和最小化可观测损失率的多目标优化模型，以一个实际的输电网作为算例，在GAMS中调用BARON求解器进行优化求解，得到基于不满意度的POF曲线以及监测装置的优化布局方案。所得结论如下。

1) 评估电网各节点监测装置的建设紧迫性，解决了已有方法忽略电网各节点电压暂降严重性的问题，使得优化结果更具有针对性。

2)以一个实际输电网为算例进行仿真验证,克服了已有研究仅用IEEE测试系统作为算例的缺陷。当分配系数 $\alpha=0.9$ 时,所得最优布局方案下监测装置布局数量为11台,建设紧迫性总权重为10.227,可观测损失率为27.6%,验证了所提优化模型的工程实践应用价值。

3)将本文优化模型与传统优化模型进行对比分析,在“实际最优平衡解”处,本文优化模型将监测装置布局在建设紧迫性权重更低的节点,且传统优化模型的投入产出比比本文模型增加了5.9%,进一步验证了本文所提优化模型更具针对性和经济性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] HAN Y, FENG Y, YANG P, et al. Cause, classification of voltage sag, and voltage sag emulators and applications: a comprehensive overview[J]. IEEE Access, 2019, 8: 1922-1934.
- [2] JIANG H W, XU Y H, LIU Z T, et al. A BPSO-based method for optimal voltage sag monitor placement considering uncertainties of transition resistance[J]. IEEE Access, 2020, 8: 80382-80394.
- [3] 汪颖,周原,张姝,等. 面向配电网电压暂降治理的线路改造优化模型[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 9-23.
WANG Ying, ZHOU Yuan, ZHANG Shu, et al. Optimization model of line reconstruction for voltage sag governance of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 9-23.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 陈礼频,杜新伟,汪伟,等. 考虑故障电阻随机不确定性的电压暂降监测点优化配置[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 93-99.
CHEN Lipin, DU Xinwei, WANG Wei, et al. Optimal voltage sag monitors placement considering randomness of fault resistance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(23): 93-99.
- [7] SHAABAN M F, OSMAN A H, ASEERI F M. A multi-objective allocation approach for power quality monitoring devices[J]. IEEE Access, 2019, 7: 40866-40877.
- [8] MARTINS P E T, ZVIETCOVICH W G, SILVA T A D O, et al. Multi-objective approach for power quality monitor allocation with symmetry in short-duration voltage variations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2): 430-437.
- [9] BRANCO H M G C, OLESKOVICZ M, DELBEM A C B, et al. Optimized allocation of power quality monitors in transmission systems: a multiobjective approach[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 64: 156-166.
- [10] 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.
- [11] 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 particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 181-187.
- [12] 肖先勇,谭亚欧,胡文曦,等. 电压暂降系统指标的监测节点数量选择与评估方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 8-14.
XIAO Xianyong, TAN Yaou, HU Wenxi, et al. Monitoring node number selection and assessment method of voltage sag system index[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 8-14.
- [13] ALI S, WU K, WESTON K, et al. A machine learning approach to meter placement for power quality estimation in smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3): 1552-1561.
- [14] 张嫣,林涌艺,邵振国. 电压暂降可观约束下的定位监测点多目标优化配置[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2375-2383.
ZHANG Yan, LIN Yongyi, SHAO Zhenguo. Multi-objective optimal allocation of monitors for voltage sag location under observability constraint[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(11): 2375-2383.
- [15] 刘平,欧阳森. 兼顾变电站暂降严重性及装置差异的电能质量监测网络优化[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 161-167.
LIU Ping, OUYANG Sen. Optimization of power quality monitoring network considering severity of substation voltage sags and difference of monitors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 161-167.
- [16] BASETTI V, CHANDEL A K. Optimal PMU placement for power system observability using Taguchi binary bat algorithm[J]. Measurement, 2017, 95: 8-20.
- [17] DE O SILVA L G, DA SILVA A P A, DE ALMEIDA-FILHO A T. Allocation of power-quality monitors using the P-Median to identify nontechnical losses[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 2242-2249.
- [18] 龙虹毓,付林,徐瑞林,等. 利用燃气机组和热泵减少不确定因素影响的电网调度[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 219-226.
LONG Hongyu, FU Lin, XU Ruilin, et al. Research on the electric grid dispatch for alleviating the uncertainties impact through gas-fired cogenerations and heat pumps[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 219-226.
- [19] PETRELLI M, DE FIORITI D, BERIZZI A, et al. A novel multi-objective method with online Pareto pruning for multi-year optimization of rural microgrids[J]. Applied Energy, 2021, 299: 117283.
- [20] SAHINIDIS N. BARON user manual[EB/OL]. [2020-12-03]. <http://www.minlp.com/downloads/docs/baron>.
- [21] 王建勋,张逸,陈晶腾,等. 省级电网电压暂降评估与工业用户潜在供电点优选[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 201-207, 224.
WANG Jianxun, ZHANG Yi, CHEN Jingteng, et al. Evaluation of provincial power grid voltage sag and optimal selection of potential power supply points for industrial users[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 201-207, 224.

作者简介:



周思宇

周思宇(1994—),男,四川成都人,博士研究生,主要研究方向为电能质量及电力系统优化(E-mail: zhouusy@std.uestc.edu.cn);

韩杨(1982—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电能质量、电力系统运行与控制(E-mail: hanyang@uestc.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Multi-objective optimization model of voltage sag monitoring devices considering construction urgency of monitoring nodes

ZHOU Siyu¹, HAN Yang^{1,2}, YANG Ping¹, WANG Congling¹, ZHANG Yi³

- (1. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. Guangdong Institute of Electronic and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Dongguan 523808, China; 3. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In order to achieve more accurate layout of voltage sag monitoring devices and ensure the stable operation of power grid, a multi-objective optimization model of voltage sag monitoring devices considering the construction urgency of monitoring nodes is proposed. Firstly, the state estimation indexes of voltage sag magnitude and voltage sag frequency are introduced to establish construction urgency evaluation model of monitoring devices. Then, comprehensively considering the construction urgency of monitoring nodes in the power system, a multi-objective optimization model is established based on voltage sag observability matrix with minimizing the total construction urgency weight and the loss rate of observability. An evaluation model of dissatisfactory degree is introduced, and the computational model of modified Pareto optimal front is established to analyze the coupling relationship between conflicting objectives. Finally, a practical transmission network with voltage level above 110 kV is taken as an example to obtain the optimal layout scheme, and the correctness and practical engineering application value of the proposed optimization model are verified by comparison with the traditional optimization model.

Key words: voltage sag; construction urgency; loss rate of observability; multi-objective optimization; Pareto optimal front

附录 A

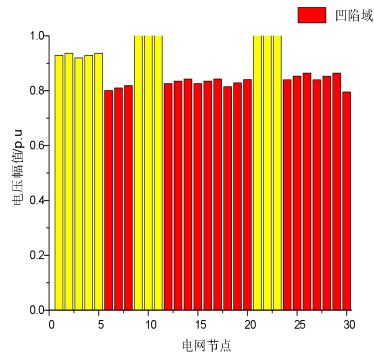


图 A1 电压暂降凹陷域示意图

Fig.A1 Schematic diagram of voltage sag exposed area

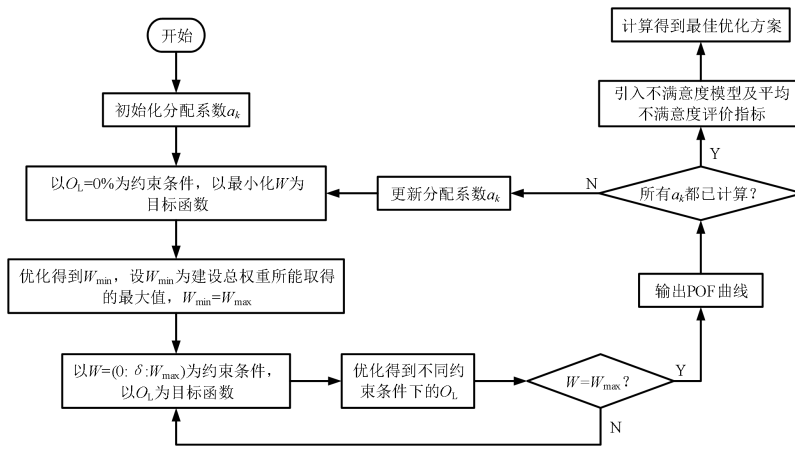


图 A2 改进 POF 的求解流程

Fig.A2 Solved process of modified POF

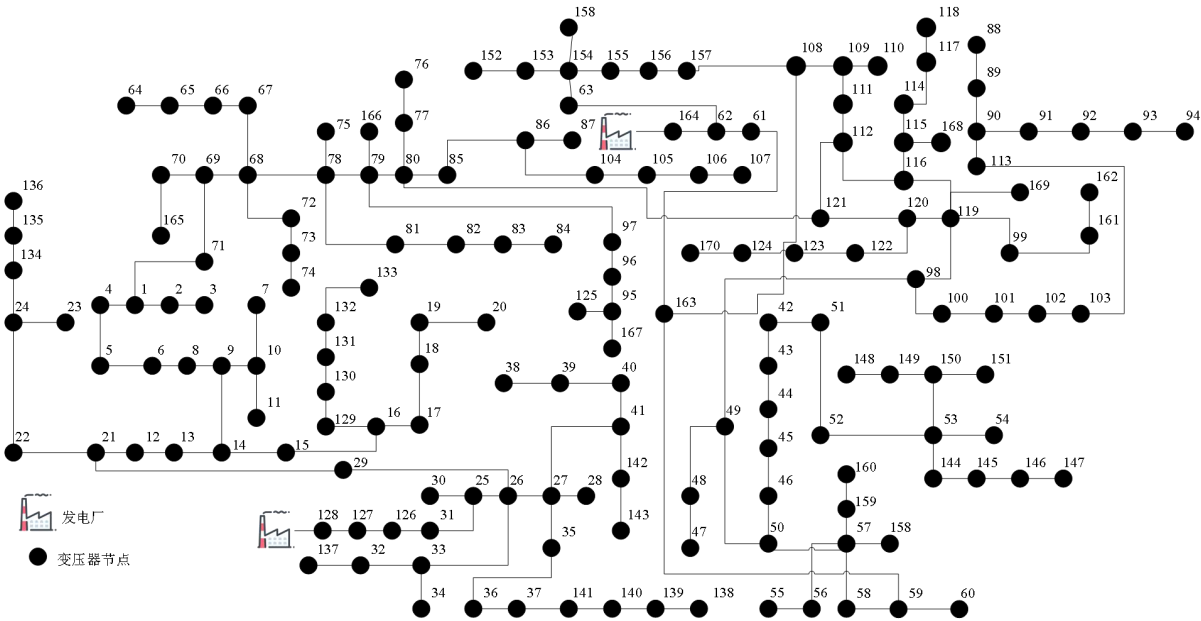


图 A3 输电网络拓扑结构

Fig.A3 Topology structure of transmission network

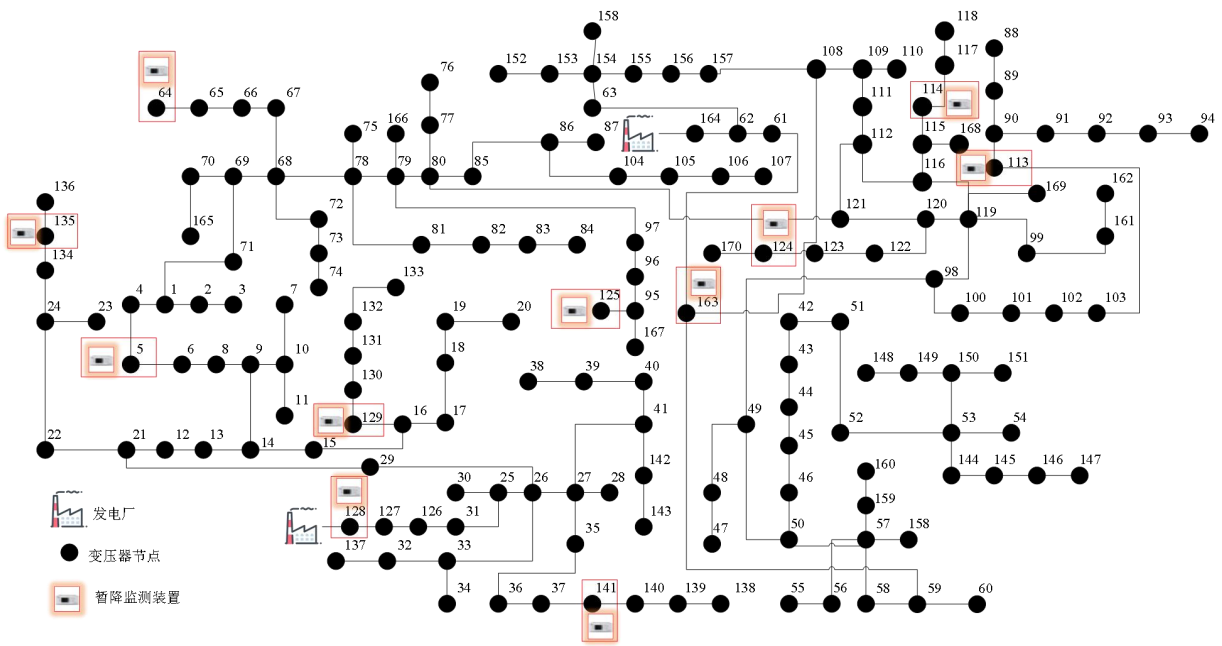


图 A4 电压暂降监测装置优化布局方案

Fig.A4 Optimized layout scheme of voltage sag monitoring devices