

省级电网电压暂降评估与工业用户潜在供电点优选

王建勋¹, 张逸¹, 陈晶腾², 吴敏辉³

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108;

2. 国网莆田供电公司, 福建 莆田 351100;

3. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350001)

摘要:针对省级电网大多节点缺乏电压暂降实测数据和评估结果, 从而造成工业用户入网缺乏依据的问题, 提出了仿真计算省级电网节点电压暂降指标以及优选工业用户潜在供电点的方法。为了更准确地评估节点电压暂降水平, 提出了省级电网的仿真计算范围, 并考虑了因仿真范围扩大而凸显的不同电压等级线路的故障率和故障类型比例的差异性; 考虑 10 kV 电压等级线路故障, 扩展电网调度部门 10 kV 电压等级线路的 BPA 模型数据, 并实现自动调用 BPA 并行仿真计算得到电网侧的节点暂降指标; 引入暂降关联成本的概念, 综合考虑电网侧暂降指标、用户侧负荷暂降耐受能力、暂降经济损失以及专线架设费用等因素, 优选潜在供电点; 通过对某省电网进行实例分析, 验证了所提方法能有效避免电压暂降过评估或欠评估问题, 为工业用户优选潜在供电点提供参考。

关键词:省级电网; 电压暂降; 蒙特卡罗法; 评估指标; 潜在供电点优选; 工业用户

中图分类号: TM 761

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202106015

0 引言

电网电压暂降现象易造成现代工业用户设备非正常运行, 导致用户产生巨大的经济损失以及不断投诉, 已成为当前供电公司面临的最严重电能质量问题之一^[1-2]。系统短路故障引起的电压暂降频次最高, 影响范围最广, 是电力系统中电压暂降的主要原因^[3], 因此研究短路故障引起的电压暂降, 是电压暂降评估工作中的重要环节。鉴于成本因素, 难以在全网布署电压暂降监测装置且短期监测结果无法满足准确评估的要求, 因此, 目前尚无覆盖全网 10 kV 及以上电压等级节点电压暂降分布特征的量化数据, 无法为各地区大量新增敏感用户优选潜在供电点提供科学依据, 降低用户遭受电压暂降的影响。

蒙特卡罗法是将概率现象作为研究对象的数值模拟方法, 能较好地反映电力系统的随机性, 被广泛应用于电网电压暂降评估^[4-5]。评估结果能否反映电网的真实工况主要受蒙特卡罗法所建随机变量概率密度模型的影响; 文献^[3]考虑线路自身属性和环境因素, 建立了更精确的线路故障概率模型, 但仅对广东省某城市电网的 220 kV 电压等级主网进行仿真分析, 未考虑该城市中更高电压等级和外部网架故障引起电压暂降的影响; 文献^[6]将系统对外联络

电源作为恒压源, 等同于不考虑系统外部网架故障所引起电压暂降的影响, 且将 220 kV 和 500 kV 电压等级线路的故障概率、故障类型比例视为一致。可见, 现有研究的仿真区域小, 忽视了未仿真线路故障造成的电压暂降影响, 且忽略了实际情况中不同电压等级线路故障概率以及故障类型比例不同的影响^[7-9], 易造成过评估或欠评估。

针对可供新增敏感用户接入的多个潜在供电点, 工程中选择时主要考虑专线架设费用的高低, 而忽略了全网各节点电压暂降指标的仿真计算结果辅助用户进行进一步优选。现有研究仅指出可用电压暂降发生频次、电压幅值期望值等电网侧指标作为优选潜在供电点的依据^[3,6], 尚无具体实施方案, 且所考虑的因素较单一, 未结合用户负荷暂降耐受能力、经济损失以及专线架设费用等因素进行综合考虑, 工程实用性和推广性均欠佳。

本文在分析省级电网电压暂降传播特点的基础上, 提出了进行节点电压暂降指标计算所需的仿真范围, 并考虑不同电压等级线路故障率、故障类型比例的差异, 结合蒙特卡罗法和 BPA 仿真计算数据, 评估电网侧 10 kV 及以上电压等级待评估节点的电压暂降水平, 并引入暂降关联成本的概念, 进一步优选可供敏感用户接入的潜在供电点。

1 省级电网电压暂降评估的仿真建模分析

1.1 省级电网电压暂降评估思路

系统短路故障引起的电压暂降具有传播距离远, 影响范围广的特点^[10], 小规模仿真忽略了较远系统故障对本地节点电压暂降的影响, 通常会低估节

收稿日期: 2020-12-24; 修回日期: 2021-04-27

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2016J01219); 福州市科技计划项目(2018-G-82)

Project supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province(2016J01219) and Fuzhou Science and Technology Plan Project(2018-G-82)

点的电压暂降水平,因此需合理扩大仿真范围。随着仿真范围的扩大,不同电压等级线路的故障概率、故障类型比例存在差异等暂降影响因素凸显而出,需进一步完善故障仿真模型,使模型更接近电网的实际工况。同时需选取建模难度低、支持外部开发调用、计算速度快的仿真工具以满足大范围仿真计算的需要,并统计仿真计算数据得到节点一年内电压暂降幅度小于 m 的暂降事件次数 $I_{\text{SARFL},m}$ 和 N 次故障仿真下某待评估节点的电压幅值平均值 E (如式(1)所示)。省级电网节点电压暂降指标的总体计算思路如图 1 所示。

$$E = \sum_{i=1}^N U_i / N \quad (1)$$

其中, U_i 为某待评估节点在第 i 次故障仿真下的电压幅值。

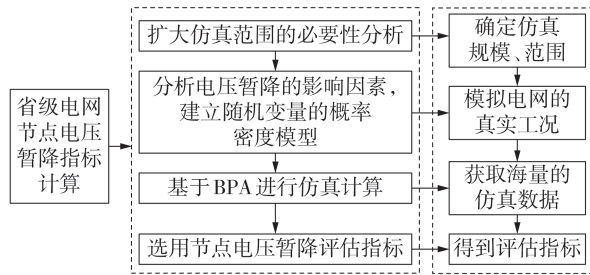


图 1 省级电网电压暂降节点指标的总体计算思路

Fig.1 General calculation idea for node voltage sag index of provincial power grid

在现有工程电压暂降评估研究中,最关注的是电压暂降的年度发生频次,根据 $I_{\text{SARFL},m}$ 和 E 的结果可初步评估节点的对应暂降水平, $I_{\text{SARFL},m}$ 的值越大或 E 的值越小,表明节点电压暂降越严重。

1.2 省级电网仿真的必要性分析

参考文献[11]和调研结果,2017年其他地市的 500 kV 电网发生故障,导致整个厦门地区的电压下降,110 kV 电压等级用户天马微、三安光电、祥达光学和 10 kV 电压等级用户玉晶光电反应尤为明显。2016年,江苏 7 座 220 kV 变电站、52 座 110 kV 变电站的 102 台电压暂降监测装置捕捉到同一电压暂降事件,经分析可知,该事件由 220 kV 新桥变压器发生重合闸引起。可见,电压暂降具有传播距离远、影响面广的特点。

华东电网某省 500 kV 电压等级网架结构图见附录 A 图 A1,其共有 75 条线路,分别在各条线路的中点设置单相接地短路故障,持续时间为 100 ms,并利用 BPA 进行仿真计算,令 220 kV 母线节点 A、B 遭受电压暂降的线路数量和占比如表 1 所示。

由表 1 可知,该省 65.33% 的 500 kV 线路发生单相接地短路故障会使 220 kV 母线节点 A 遭受电压暂降,且故障造成的电压暂降幅度较小,若线路发生其

表 1 发生单相短路故障时引发母线节点 A 和 B 电压暂降的线路数量和占比

Table 1 Number and proportion of lines causing voltage sag of bus node A and B during single phase short circuit fault

电压暂降幅度小于 90% 的母线节点	线路数量 / 条	占比 / %
A	49	65.33
B	46	61.33

他类型短路故障,影响将更为严重。母线节点 A、B 受上级电网的影响不同,说明当多路电源来自上一级网络不同节点时,需考虑上级电网的情况。

由上述分析可以看出,现有研究^[3,6]的仿真范围不足以反映待评估节点所受电压暂降的真实情况,需要合理地扩大仿真范围,兼顾远方线路故障引起电压暂降的影响,使节点电压暂降指标的计算结果更准确。

1.3 仿真计算范围

根据已有研究和网架联络格局,存在以下 2 点事实:①由于变压器阻抗比线路阻抗大得多,在电压暂降传递时,更多的是由高电压等级的暂降传递到低电压等级,低电压等级故障对高电压等级的影响很小^[12];②目前国内大多省份形成了 220 kV 和 500 kV 电压等级线路全省联网、110 kV 及以下电压等级线路地市联网的格局,1000 kV 电压等级线路大多架设于省界,且数量少,故本文暂不考虑。综上所述,不同省份 500 kV 及以下电压等级、同省中不同地市 110 kV 及以下电压等级线路故障引起的电压暂降之间的相互影响小,如图 2 中虚线箭头范围所示。因此,为了提高实用性和推广性,待评估节点所在省份以外区域、所处地市以外其他地市 110 kV 及以下电压等级线路故障造成的电压暂降影响可忽略不计。综上所述,为了准确计算 10 kV 及以上电压等级工业用户供电点的电压暂降指标,本文给出了全省 500、220 kV 电压等级线路以及待评估节点所在省市的 110、35、10 kV 电压等级线路的仿真计算范围,如图 2 所示。同时可一次性得到整个地市

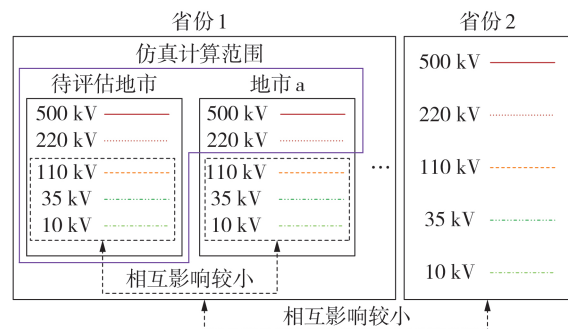


图 2 省级电网仿真计算范围示意图

Fig.2 Schematic diagram of simulation grid calculation scope of provincial power grid

10 kV 及以上电压等级母线节点的电压暂降指标。

1.4 基于蒙特卡罗法的省级电网短路故障模拟仿真

省级电网更具复杂性,大范围电网涉及不同电压等级的线路,且线路故障概率不同,电压暂降幅度又主要取决于故障位置和短路故障类型,这些电压暂降影响因素都具有随机性。研究结果表明,蒙特卡罗法能较好地模拟电网侧故障发生的随机性,且该方法的使用不受系统复杂性的限制^[4]。因此,本文选取电压等级、故障类型、故障线路、故障位置以及故障持续时间作为随机变量,采用蒙特卡罗法模拟省级电网短路故障的发生。

1) 电压等级。

不同电压等级线路的故障率为 $\gamma_{FR,X}$ (X 为电压等级),仿真范围内不同电压等级线路总长度为 $L_{TL,X}$,故障所在电压等级用随机数 x_1 的分布表示,如式(2)所示。

$$F_1 = \begin{cases} 500 & 0 \leq x_1 < P_{500} \\ 220 & P_{500} \leq x_1 < P_{500} + P_{200} \\ 110 & P_{500} + P_{200} \leq x_1 < P_{500} + P_{200} + P_{100} \\ 35 & P_{500} + P_{200} + P_{100} \leq x_1 < P_{500} + P_{200} + P_{100} + P_{35} \\ 10 & P_{500} + P_{200} + P_{100} + P_{35} \leq x_1 \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $P_X = \gamma_{FR,X} L_{TL,X} / \sum \gamma_{FR,X} L_{TL,X}$, X 的取值为 500、220、110、35、10 kV; 随机数 x_1 服从 $[0, 1]$ 范围内的均匀分布。

2) 故障类型。

故障类型的概率密度模型可利用随机数 x_2 的分布表示,如式(3)所示。

$$F_2 = \begin{cases} 1 & 0 \leq x_2 < P_{F1,X} \\ 2 & P_{F1,X} \leq x_2 < P_{F1,X} + P_{F2,X} \\ 3 & P_{F1,X} + P_{F2,X} \leq x_2 < P_{F1,X} + P_{F2,X} + P_{F3,X} \\ 4 & P_{F1,X} + P_{F2,X} + P_{F3,X} \leq x_2 \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $P_{Fk,X}$ 为电网中 X 电压等级线路发生第 k 种故障的概率, $k=1, 2, 3, 4$ 分别对应单相接地、两相短路、两相接地短路、三相短路故障; x_2 服从 $[0, 1]$ 范围内的均匀分布。

3) 故障线路。

线路越长,发生故障的概率越高。故障线路的概率密度模型用随机数 x_3 的分布表示,如式(4)所示。

$$F_3 = \begin{cases} l_{1,X} & 0 \leq x_3 < l_{1,X} / L_{TL,X} \\ l_{2,X} & l_{1,X} / L_{TL,X} \leq x_3 < (l_{1,X} + l_{2,X}) / L_{TL,X} \\ l_{3,X} & (l_{1,X} + l_{2,X}) / L_{TL,X} \leq x_3 < (l_{1,X} + l_{2,X} + l_{3,X}) / L_{TL,X} \\ \vdots & \end{cases} \quad (4)$$

其中, $l_{i,X}$ 为第 i 条 X 电压等级线路的长度; x_3 服从 $[0, 1]$ 范围内的均匀分布。

4) 故障位置。

假设同一线路任意位置发生故障的概率一致,故障位置用服从 $[0, 1]$ 范围内均匀分布的随机数 x_4 表示。

5) 故障持续时间。

本文假定 10 kV 电压等级线路的故障持续时间服从期望为 0.5 s、标准差为 0.133 的正态分布^[13], 35 kV 和 110 kV 电压等级线路的故障持续时间分别服从 $[0.5, 0.9]$ 、 $[0.1, 0.5]$ s 范围内的均匀分布^[14], 220 kV 和 500 kV 电压等级线路的故障持续时间分别取为 90、120 ms^[15], 故障持续时间用随机数 x_5 表示。

2 基于 BPA 的节点电压暂降指标计算

2.1 BPA 电网模型及数据格式

机电暂态的研究对象为基波分量^[16], 国家标准 GB/T 30137—2013^[17] 中将电压暂降定义为电力系统中某点工频电压的方均根值, 可看出电压暂降属于机电暂态的研究范畴。在实际情况中, 机电暂态仿真软件 BPA 已成熟应用于电网规划设计、科研及生产运行工作中, 不仅符合风电机组低电压穿越建模仿真平台的要求^[18], 还可应用于实际网架电压暂降的研究工作中^[3, 19]。因此, 本文选取 BPA 软件作为量化计算全网电压暂降分布特征的支撑工具。

BPA 数据包含 dat 文件和 swi 文件, 分别描述电网拓扑和网络元件的具体参数。BPA 中的模型数据以卡片文本形式进行管理, 利用母线名称实现数据信息交换, 无需形成可视化的电气接线图, 不同的数据卡表征不同的模型元件, 加上必要的控制语句可构成网络的模型数据。swi 文件负责控制 BPA 的暂态稳定计算, 可根据故障参数在 swi 文件中设置故障卡进行短路故障仿真计算。我国 BPA 数据文件普遍采用网、省、地多级管理模式, 下一级 BPA 数据文件一般是在上一级文件的数据基础上进行进一步丰富细化, 且由电网调度部门定期维护、更新, 时效性强。由于与工业用户供电接入点关系更密切的电压等级为 10、35、110 kV, 故本文采用包含 10、35、110 kV 等电压等级数据在内的地调部门 BPA 数据文件作为网络模型数据, 以满足工业用户供电接入点电压暂降评估的需求。

2.2 扩展 BPA 文件数据规模

目前地调部门提供的 BPA 数据文件没有 10 kV 电压等级线路数据, 但 10 kV 电压等级线路的短路故障是引起 10 kV 母线电压暂降的重要原因, 因此需对待评估节点所在地的 10 kV 网架进行建模, 用 10 kV 大馈线进行简化代替。在 BPA 线路模型中, 线路数据卡的必要参数包括线路首/末端母线名、线路阻抗、电压等级和回路标志, 10 kV 大馈线首

端母线名即原有BPA文件中的10 kV母线节点,进行匹配即可,同时需新增10 kV大馈线末端节点,节点名不能重复且不超过8 Byte,若待评估节点所在地的10 kV大馈线数量为 L 条,则需在BPA潮流文件中新增 L 个交流节点卡表示大馈线末端节点。线路阻抗等于同属于一条大馈线的分段线路阻抗之和,分段线路阻抗可根据线路长度以及线路型号的电抗率、电抗率计算得到。回路标志可统一设为某一常数 C_{const} 。由此生成仿真10 kV网架所需的 L 个线路数据卡,待评估节点所在地的10 kV网架扩展逻辑如图3所示。

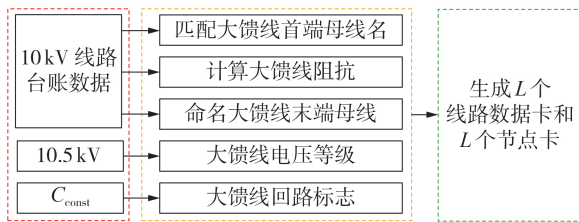


图3 10 kV网架扩展逻辑图

Fig.3 Logic diagram of 10 kV grid expansion

2.3 评估步骤

基于蒙特卡罗法模拟电网发生的短路故障,并应用仿真计算工具BPA得到仿真数据,即可进行基于蒙特卡罗法的电压暂降评估,评估步骤如图4所示。

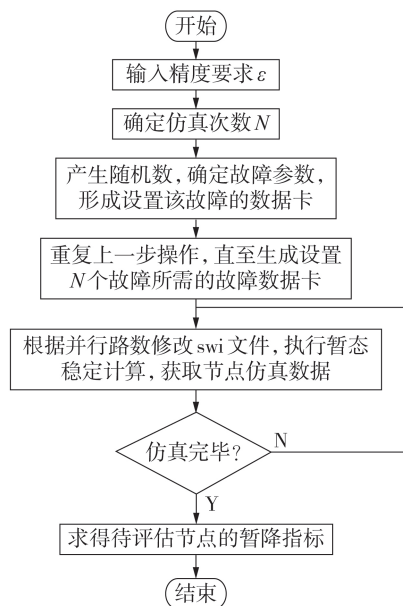


图4 基于蒙特卡罗法的电压暂降评估流程

Fig.4 Flowchart of voltage sag assessment based on Monte Carlo method

1) 确定仿真次数。

根据文献[20],若事件每年发生 μ 次,则监测周期至少为 $4/(\mu\varepsilon^2)$ a才能满足精度要求 ε 。因此,根据精度要求可确定需要进行仿真的次数。

2) 生成短路故障参数。

首先生成随机数 x_1-x_4 ,然后根据 x_1-x_3 和式(2)~(4)判断故障所在的电压等级、故障类型、故障线路,结合故障持续时间 x_5 ,从而得到进行仿真所需的故障参数。

3) BPA故障仿真分析。

根据故障参数,修改swi文件中的故障数据卡形成新的故障,即可进行短路故障仿真计算,获取待评估节点的电压暂降幅值 U 。由于BPA软件难以完成多次独立故障仿真分析,编写对应的计算接口,采用多线程以及并行计算技术,自动替换故障控制语句,进行多路并行仿真计算,可以解决人工难以胜任的重复操作计算、提高计算效率、避免误操作,具体步骤如下:

(1) 一次性集中生成 N 次故障所需的故障数据卡控制语句列表,使仿真计算更高效;

(2) 根据并行计算的数量,多路替换swi文件中的故障数据卡;

(3) 运用多线程、并行计算技术,调用暂态稳定分析程序进行多路计算和观测仿真计算结束时刻,进而关闭仿真窗口;

(4) 读取待评估节点的电压暂降幅值。

循环步骤(2)~(4),直至 N 次故障全部仿真完成,最终可计算得到待评估节点的 E 和 $I_{SARFL,m}$ 值。 $I_{SARFL,m}$ 的计算公式为:

$$I_{SARFL,m} = R_m N_f \quad (5)$$

其中, R_m 为仿真结果中节点电压暂降幅度小于 m 的电压暂降事件占比; N_f 为仿真线路的年故障次数,可根据所涉及不同电压等级仿真线路的长度和故障率计算得到,即 $N_f = \sum \gamma_{FR,X} L_{TL,X}$ 。

3 工业用户潜在供电点优选方案

根据《国家电网公司业扩报装工作规范》和《国家电网公司业扩供电方案编制导则》,除有特殊需要之外,用户的供电电压等级一般参照表2确定。本文将可供已确定供电电压等级用户接入的母线节点称为潜在供电点,并在此基础上进一步考虑电压暂降因素,优选潜在供电点。

表2 用户供电电压等级的确定

Table 2 Determination of power supply voltage level for users

供电电压等级/kV	受电变压器总容量/(MV·A)	供电电压等级/kV	受电变压器总容量/(MV·A)
10	0.05~10	110	20~100
35	5~40	220	≥100

科学有效地结合电网侧电压暂降情况和用户负荷暂降耐受力等多个因素优选潜在供电点,能从源头上减少电压暂降的影响,降低经济成本。

从经济最优角度出发,敏感用户的最优供电点在项目周期内暂降关联成本最小,暂降关联成本包括项目周期内用户因电压暂降造成的经济损失以及用户专线架设费用(目前规模以上工业用户普遍采用专线供电,投资费用高且由用户承担)。在工程实际中,用户难以给出不同电压暂降幅度和持续时间下的经济损失数据,故本文将问题简化为提供造成用户负荷非正常运行的最大电压暂降幅度 t 、 t 及其以下幅度不同持续时间的电压暂降事件平均经济损失 L_{sag} 。考虑到大多数企业存在时间低于专线使用年限这一实际情况,将项目周期按照中国制造业公司的平均寿命计算,并根据式(6)对入网敏感用户接入潜在供电点 i 的暂降关联成本 y_i 进行预估。

$$y_i = I_{\text{SARFL},t}^i L_{\text{sag}} T + C_{l,x} L_d^i \quad (6)$$

其中, $I_{\text{SARFL},t}^i$ 为潜在供电点 i 的电压暂降幅度小于 t 的年暂降次数; T 为项目周期; $C_{l,x}$ 为单位长度的 X 电压等级线路的架设费用; L_d^i 为潜在供电点 i 与待入网暂降敏感用户厂址之间的距离。则最优供电点的暂降关联成本 y 为:

$$y = \min \{ y_i, i = 1, 2, \dots, N_{\text{PCC}} \} \quad (7)$$

其中, N_{PCC} 为距待入网敏感用户一定范围(如用户所在地供电公司所属辖区,具体可按实际确定)内的潜在供电点数量。

4 算例分析

4.1 实际电网模型

本文选取华东电网P省所属地市C的10 kV及以上电压等级母线作为待评估节点,以C市地调部门的BPA数据文件为基础,扩充C市10 kV电压等级线路数据作为网络模型数据。算例中不同电压等级线路的故障概率^[8,21]、故障类型比例^[9,22-23]和线路长度参数分别见附录A表A1—A3,表A2中10、35、110、220 kV线路的两相短路和两相接地短路故障类型比例按照文献[22]中的1:2进行划分。

4.2 电压暂降评估

采用如下3种方法进行仿真计算:方法1参考文献[7]仅计及C市电网110 kV电压等级线路故障对110 kV节点c产生的暂降影响,忽略更高电压等级线路故障引起的暂降影响;方法2参考文献[6]不考虑不同电压等级线路故障率、故障类型比例的差异,并以110 kV电压等级线路的数据为例进行计算,仿真分析的线路包括P省500、220 kV电压等级线路以及C市110、35、10 kV电压等级线路;方法3(即本文方法)与方法2的区别在于,方法3在省级电网短路故障仿真建模中考虑了不同电压等级线路故障率、故障类型具有差异的特点。3种方法均将精度要求 ε 设为0.02,仿真次数 $N=10000$ 次,经BPA仿真计算后,解析结果可得待评估节点的 E 和 $I_{\text{SARFL},m}$ 值。限于

篇幅,随机选取C市5个不同电压等级的待评估节点为例进行分析,结果如表3所示。表中, E_k 、 $I_{\text{SARFL},k,m}$ 分别为节点 k 的 E 和 $I_{\text{SARFL},m}$ 值, $k \in \{a, b, c, d, e\}$,节点a—e的电压等级分别为500、220、110、35、10 kV, E_k 为标么值。本文同时统计了P省2019年涉及上述5个电压等级185处监测点的电压暂降实测数据(如附录A表A4所示),得到不同电压等级节点的 $I_{\text{SARFL},90\%}$ 平均值 $\bar{I}_{\text{SARFL},90\%}$,结果如表4所示。由表4可知,不同电压等级的暂降频次有差异,但未达到数量级差距。

表3 节点电压暂降指标结果

Table 3 Node voltage sag index results

方法	节点	E_k	$I_{\text{SARFL},k,m}$ / 次				
			90%	80%	70%	60%	50%
1	c	0.999 1	1.4229	0.8004	0.7114	0.6225	0.1225
	a	0.9404	37.2971	16.6897	9.3656	2.8582	0
	b	0.9333	39.2252	19.7123	13.4903	6.2778	0.0510
2	c	0.9321	43.7404	20.2832	14.9847	7.2825	0.7401
	d	0.9282	44.0419	21.6868	15.8013	8.2763	0.9442
	e	0.9203	45.3528	21.7681	15.9336	8.9107	1.1318
3	a	0.9955	7.4701	2.4900	0.9782	0.0889	0
	b	0.9918	8.4483	4.5354	3.2015	1.4229	0
	c	0.9892	11.3829	4.8022	3.5572	1.9564	0.6225
d	0.9861	17.9637	11.0272	8.1815	3.8240	2.3122	
	e	0.9844	19.7423	11.6497	8.8929	5.9583	3.3793

注:表头中数据为电压暂降幅度 m 的取值,后同。

表4 不同电压等级监测点 $I_{\text{SARFL},90\%}$ 实测数据的平均值

Table 4 Average values of measured data of $I_{\text{SARFL},90\%}$ at different voltage level monitoring points

电压等级 / kV	$\bar{I}_{\text{SARFL},90\%}$ / 次	电压等级 / kV	$\bar{I}_{\text{SARFL},90\%}$ / 次
500	7.5	35	16.1
220	8.7	10	21.2
110	13.3		

由表3可看出,采用方法2或方法3时, $E_a > E_b > E_c > E_d > E_e$, $I_{\text{SARFL},e,m} > I_{\text{SARFL},d,m} > I_{\text{SARFL},c,m} > I_{\text{SARFL},b,m} > I_{\text{SARFL},a,m}$,说明高电压等级节点受电压暂降的影响小,这与表4所示实测值体现的趋势一致。综合分析表3和表4中的 $I_{\text{SARFL},90\%}$ 可看出,方法3(本文方法)所得结果与实测值最接近,限于实测样本数量较少,虽存在一定的误差,但能满足工程应用要求。相较于本文方法所得结果,方法1中节点c的 E 值增大, $I_{\text{SARFL},m}$ 大幅下降,计算结果偏乐观,这是因为方法1未考虑高电压等级线路故障造成的电压暂降影响。因此,省级电网仿真评估能弥补小范围仿真低估节点电压暂降水平的不足。相较于本文方法所得结果,方法2的结果主要有两大不同:①不同电压等级节点电压暂降频次差距下降,这主要是由不同电压等级线路故障率、故障类型比例取值一致造成的;②除35 kV和10 kV电压等级线路的 $I_{\text{SARFL},10\%}$,其他不同程度的年暂降频次均有较大幅度提高,且各节点的 E 值均减

小,暂降影响结果较本文方法更严重。这是因为:方法2中不同电压等级线路统一使用110 kV电压等级线路的故障率和故障类型比例,这就造成高电压等级线路的故障率被人为抬高,低电压等级线路的故障率被压低,导致高电压等级线路的故障占比提高;此外,发生故障的线路电压等级越高,引起的电压暂降传播影响范围越广,从而造成各电压等级节点电压暂降评估结果恶化的现象。综上所述,本文方法能更好地模拟电网的真实情况,有效避免过评估或欠评估问题。

4.3 供电点优选

C市有一处于筹建状态的电压暂降敏感用户,经分析,其新建厂址10 km范围内存在可供该用户接入的4个10 kV潜在供电点(供电点1—4)和1个35 kV潜在供电点(供电点5),潜在供电点与新建厂址之间的实测距离 L_d 以及节点电压暂降指标结果如表5所示(表中 E 为标么值)。由表可看出,各潜在供电点的 $I_{SARFL,m}$ 值和 E 指标结果的大小排序不一定完全反向,且随着电压暂降幅度 m 的变化,潜在供电点的 $I_{SARFL,m}$ 值大小排序或有变化,即对于 E 值较大的节点,其 $I_{SARFL,m}$ 值不一定更小。因此,仅根据 E 值的大小顺序优选潜在供电点未必是最优方案,需综合考虑节点 $I_{SARFL,m}$ 值的分布情况以及造成用户负荷非正常运行的最大电压暂降幅度 t 等因素。若10 kV和35 kV电压等级架空线路架设费用分别为20、60万元/km,项目周期设为中国制造业公司的平均寿命8.25 a, L_{sag} 设为6万元,随着 t 的变化,各潜在供电点的暂降关联成本如图5(a)所示。 L_{sag} 会因用户所属行业的不同而有较大的差异,当 $t=70\%$ 时,暂降关联成本与 L_{sag} 之间的关系曲线如图5(b)所示。

由图5(a)可看出,随着 t 的增大,暂降关联成本最低的节点由供电点4向供电点1转移。结合表5和图5(a)可看出, E 值最大、 $I_{SARFL,m}$ 值最小、电压等级最高、距离最近的潜在供电点未必能使暂降关联成本最低,相同电压等级潜在供电点的暂降关联成本存在一定的差距。因此,需综合考虑造成用户负荷非正常运行的最大电压暂降幅度 t 、 $I_{SARFL,m}$ 值和专线架设费用等因素科学选取供电点,降低暂降关联成本。结合表5和图5(b)可看出,随着 L_{sag} 的增大,

表5 潜在供电点的电压暂降指标结果

供电点	E	$I_{SARFL,m}$ / 次					L_d / km
		90%	80%	70%	60%	50%	
1	0.9840	19.6534	11.7387	10.2269	6.4918	4.8911	3.35
2	0.9844	20.3648	12.8058	9.6044	5.5136	3.2015	6.73
3	0.9826	20.5426	12.8058	11.1162	7.7368	5.5136	2.31
4	0.9852	20.0980	10.3158	8.1815	4.1797	3.2015	5.17
5	0.9863	17.4301	10.6715	7.7368	3.7350	1.8675	3.58

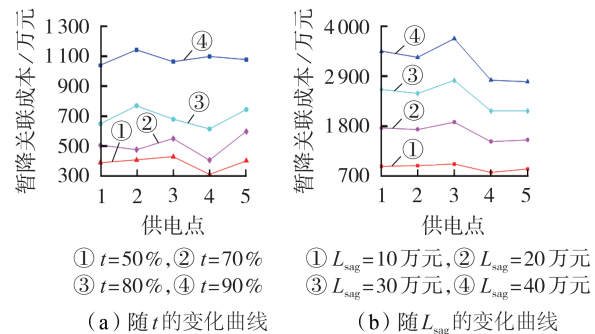


图5 暂降关联成本随 t 和 L_{sag} 的变化曲线

Fig.5 Changing curves of voltage sag associated cost vs. t and L_{sag}

$I_{SARFL,70\%}$ 较小的供电点4和供电点5的优势不断凸显,此时表征各节点电压暂降水平的 $I_{SARFL,m}$ 值成为辅助敏感用户优选潜在供电点的最重要因素,专线架设费用的重要性呈下降趋势。

综上所述,本文所提方法在优选潜在供电点时能综合考虑多种不可或缺的影响因素,更适合工业应用。

5 结论

本文提出一种省级电网电压暂降评估与工业用户潜在供电点优选的方法,解决了无全网电压暂降分布特征量化数据和潜在供电点优选实用方案的问题。实例分析结果表明:

1)所提省级电网规模下的仿真计算方法能更准确评估节点的电压暂降水平,可一次性输出待评估节点所在地市10 kV及以上电压等级节点的电压暂降评估结果,弥补大多节点缺乏监测数据的问题,为全网电压暂降防控提供依据;

2)所提潜在供电点优选方法考虑因素全面,最优供电点随各影响因素联动变化,可有效指导用户开展入网工作,具备工程应用价值。

在仿真计算过程中积累了大量不同位置短路故障引起整个地市10 kV及以上电压等级节点的电压暂降数据,以该数据为基础,研究省级电网框架下工业用户的暂降域、暂降源定位、网架薄弱点的识别和差异化运维,是值得继续研究的课题。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张逸,李为明,张嫣,等. 考虑供电系统运行方式的工业过程电压暂降耐受特性评估方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(12): 205-211.
ZHANG Yi, LI Weiming, ZHANG Yan, et al. Evaluation method for voltage sag tolerance characteristics of industrial process considering operation mode of power supply system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 205-211.
- [2] 叶曦,刘开培,李志伟. 不确定条件下计及线路保护动作特

- 性的电压暂降频次评估[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 169-176.
- YE Xi, LIU Kaipei, LI Zhiwei. Voltage sag frequency assessment considering action characteristics of line protection in uncertain conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 169-176.
- [3] 曾江, 蔡东阳. 基于组合权重的蒙特卡洛电压暂降评估方法[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1469-1475.
- ZENG Jiang, CAI Dongyang. A Monte Carlo assessment method of voltage sags based on combination weight[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1469-1475.
- [4] 章雪萌. 电压暂降源的定位与暂降经济性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- ZHANG Xuemeng. Study of voltage sag source location and economic assessment of voltage sag[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010.
- [5] 宋云亭, 郭永基, 张瑞华. 电压骤降和瞬时供电中断概率评估的蒙特卡罗仿真[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 47-51.
- SONG Yunting, GUO Yongji, ZHANG Ruihua. Probabilistic assessment of voltage sags and momentary interruption based on Monte-Carlo simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 47-51.
- [6] 易杨, 张尧, 钟庆. 基于蒙特卡罗方法的大型电力用户电压暂降评估[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 57-60, 75.
- YI Yang, ZHANG Yao, ZHONG Qing. Assessment of voltage sags in large power consumer based on Monte Carlo method[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 57-60, 75.
- [7] GOSWAMI A K, GUPTA C P, SINGH G K. Assessment of financial losses due to voltage sags in an Indian distribution system[C]//2008 IEEE Region 10 and the Third international Conference on Industrial and Information Systems. Kharagpur, India: IEEE, 2008: 1-6.
- [8] 杨晟. 镇江电网110 kV输电线路防雷策略研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- YANG Sheng. Lightning protection on 110 kV transmission line in Zhenjiang Power Grid[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.
- [9] 司学振, 李琼林, 杨家莉, 等. 基于实测数据的电压暂降特性分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 144-149.
- SI Xuezheng, LI Qionglin, YANG Jiali, et al. Analysis of voltage sag characteristics based on measured data[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 144-149.
- [10] 王宾, 潘贞存, 徐丙垠. 配电系统电压跌落问题的分析[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 56-59.
- WANG Bin, PAN Zhencun, XU Bingyin. Analysis of voltage sags in distribution system[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 56-59.
- [11] 吴颖, 蒋衍, 李为明, 等. 厦门翔安地区电压暂降问题分析及防治措施[J]. 电气技术, 2019, 20(7): 52-56.
- WU Ying, JIANG Yan, LI Weiming, et al. Analysis and treatment measures of voltage sag in Xiang'an district of Xiamen[J]. Electrical Engineering, 2019, 20(7): 52-56.
- [12] 陶顺. 电压暂降对配电系统可靠性影响及其评估指标的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.
- TAO Shun. Study on distribution reliability considering voltage sags and acceptable indices[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.
- [13] 李玲. 计及电压暂降的供电可靠性评估方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- LI Ling. Study on evaluation method of power supply reliability considering voltage sags[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [14] 杨晓东. 电压暂降的随机预估及其经济管理方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- YANG Xiaodong. Research on stochastic estimation and economic management of voltage sag[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [15] 国家电网公司科技部. 国家电网安全稳定计算技术规范: Q/GDW 1404—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [16] 丁平, 赵敏, 田鹏飞, 等. 基于频率相关网络等值和时变动态相量直流模型的机电暂态仿真方法[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1658-1665.
- DING Ping, ZHAO Min, TIAN Pengfei, et al. An electromechanical transient simulation method based on frequency-dependent network equivalent and time-varying dynamic phasor DC model[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1658-1665.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量电压暂降与短时中断: GB/T 30137—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [18] 国家能源局. 风电机组低电压穿越建模及验证方法: NB/T 31053—2014[S]. 北京: 新华出版社, 2015.
- [19] 崔江静, 廖辰川, 彭显刚, 等. 电压暂降对珠澳电网影响的仿真研究[J]. 广东电力, 2016, 29(3): 52-55, 66.
- CUI Jiangjing, LIAO Chenchuan, PENG Xiangang, et al. Simulation research on influence on Zhuhai-macao power grid by voltage sag[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(3): 52-55, 66.
- [20] 陶顺, 肖湘宁, 刘晓娟. 短路故障引起的电压暂降与短时间内断事件的技术经济评估初探[J]. 电气技术, 2005(7): 19-25.
- TAO Shun, XIAO Xiangning, LIU Xiaojuan. Technical and economic evaluation of voltage sag and short time interruption caused by short circuit fault[J]. Electrical Engineering, 2005(7): 19-25.
- [21] 国家能源局. 2017年全国电力可靠性年度报告[R/OL]. [2020-09-07]. <http://www.nea.gov.cn/down/kekaoxingbaogao2017.pdf>.
- [22] 尹元. 计及电压暂降的配电网可靠性的模拟算法及实现[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.
- YIN Yuan. Simulation arithmetic and realization of distribution network taking into account voltage sags[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.
- [23] ESZTERGALYOS J, ANDRICHAK J, COLWELL D H, et al. Single phase tripping and auto reclosing of transmission lines-IEEE Committee Report[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(1): 182-192.

作者简介:



王建勋

王建勋(1993—),男,福建安溪人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量分析与控制技术(E-mail:78832677@qq.com);

张逸(1984—),男,湖北武汉人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电能质量、主动配电网及电力数据分析(E-mail:zhangyiscu@163.com);

陈晶腾(1990—),男,福建莆田人,工程师,硕士,主要研究方向为电能质量及电力数据分析(E-mail:848310286@qq.com)。

(编辑 陆丹)

(下转第224页 continued on page 224)

Identification and location of infrared image for substation equipment based on single-stage object detection algorithm

ZHU Huiling, NIU Zhewen, HUANG Kekan, TANG Wenhui

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to identify and locate the substation equipment in infrared image, a detection method based on improved YOLOv3 algorithm is proposed. Using the infrared image set of substation equipment collected in the field, the image enhancement algorithm based on Retinex and image processing methods such as threshold segmentation are used to preprocess the image set. Then the parameters of YOLOv3 algorithm are optimized based on infrared images of substation equipment, and the improved YOLOv3 network is trained through the transfer learning strategy to solve the problem of insufficient number of image set samples. The experimental results show that the proposed method can achieve a satisfactory detection accuracy in the case of a small number of samples, and can quickly identify and locate substation equipment in infrared images.

Key words: substation equipment; object detection; Retinex image enhancement; YOLOv3; transfer learning

(上接第207页 continued from page 207)

Evaluation of provincial power grid voltage sag and optimal selection of potential power supply points for industrial users

WANG Jianxun¹, ZHANG Yi¹, CHEN Jingteng², WU Minhui³

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. State Grid Putian Electric Power Company, Putian 351100, China;

3. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract: Aiming at the problem that most nodes of provincial power grid are lack of measured data and evaluation results of voltage sag, which leads to the lack of basis for industrial users to enter the network, a method of simulating and calculating the voltage sag index of provincial power grid nodes and optimally selecting the potential power supply points of industrial users is proposed. In order to evaluate the voltage sag level of nodes more accurately, the simulation calculation range of provincial power grid is proposed, and the difference of fault rate and fault type ratio of lines with different voltage levels due to the expansion of simulation range is considered. Considering the faults of 10 kV voltage level lines, the BPA model data of 10 kV voltage level lines in the power grid dispatching department is extended, and the automatic call of BPA parallel simulation calculation is realized to obtain the voltage sag index of grid side nodes. The concept of voltage sag associated cost is introduced, and the potential power supply points are selected optimally by comprehensively considering factors such as the grid side voltage sag index, the user side load sag tolerance degree, the voltage sag economic loss, the installation cost of special line, and so on. Through example analysis of a provincial power grid, it is verified that the proposed method can effectively avoid the problem of over-evaluation or under-evaluation of voltage sag, which can provide a reference for industrial users to select potential power supply points.

Key words: provincial power grid; voltage sag; Monte Carlo method; evaluation index; optimal selection of potential power supply points; industrial users

附录 A

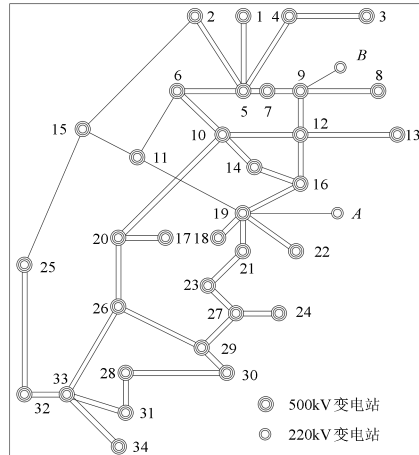


图 A1 华东电网某省 500 kV 电网拓扑
Fig.A1 Topology of a 500 kV provincial power grid in East China power grid

表 A1 不同电压等级线路的故障率

Table A1 Failure probability of lines with different voltage levels

电压等级/kV	线路故障率/[次·(km·a)-1]	电压等级/kV	线路故障率/[次·(km·a)-1]
500	0.0015	35	0.0268
220	0.0033	10	0.1023
110	0.0089		

表 A2 不同电压等级线路的故障类型比例

Table A2 Proportion of fault types for lines with different voltage levels

电压等级/kV	故障类型比例/%			
	单相短路	两相短路	两相接地短路	三相短路
500	93.00	4.00	2.00	1.00
220	78.26	5.80	11.59	4.35
110	81.05	3.16	6.31	9.48
35	62.96	8.64	17.29	11.11
10	52.26	11.61	23.23	12.90

表 A3 仿真区域不同电压等级线路长度

Table A3 Lengths of linderes with different voltage levels in simulation area

仿真区域	电压等级/kV	线路长度/km	仿真区域	电压等级/kV	线路长度/km
P 省	500	5462	C 市	35	243
P 省	220	13756	C 市	10	7944
C 市	110	1003			

表 A4 P 省 2019 年 185 处监测点的电压暂降发生频次

Table A4 Frequency of voltage sag at 185 monitoring points in P Province at 2019

监测点	电压等级/kV	电压暂降频次	监测点	电压等级/kV	电压暂降频次	监测点	电压等级/kV	电压暂降频次	监测点	电压等级/kV	电压暂降频次	监测点	电压等级/kV	电压暂降频次
1		21	38		11	75		5	112		10	149		20
2		38	39		7	76		9	113		8	150		35
3		20	40		34	77		19	114		9	151		18
4		21	41		46	78		27	115		8	152		10
5		22	42		23	79		18	116		8	153		14
6		24	43		22	80		16	117		9	154		17
7		68	44		5	81		18	118		9	155		10
8		23	45		2	82		20	119		7	156		15
9		26	46		2	83		18	120		7	157		8
10		24	47	10	57	84		13	121		7	158		5
11		21	48		2	85		20	122		4	159		1
12		4	49		4	86		23	123		8	160		1
13		4	50		10	87		13	124		11	161		5
14		5	51		34	88		31	125		10	162		2
15		30	52		8	89		21	126		8	163		1
16		48	53		30	90		18	127		5	164		2
17		4	54		28	91		12	128		11	165		1
18		12	55		28	92	110	6	129		3	166	220	9
19	10	4	56		19	93		9	130	220	6	167		7
20		27	57		24	94		6	131		6	168		10
21		5	58		14	95		16	132		19	169		7
22		4	59		28	96		14	133		10	170		9
23		13	60		12	97		14	134		14	171		8
24		17	61		7	98		5	135		19	172		8
25		17	62	35	17	99		16	136		11	173		9
26		16	63		17	100		22	137		16	174		9
27		40	64		7	101		12	138		16	175		7
28		9	65		6	102		2	139		9	176		7
29		17	66		37	103		5	140		1	177		2
30		15	67		9	104		3	141		17	178		4
31		97	68		9	105		7	142		11	179		9
32		13	69		10	106		4	143		1	180		3
33		13	70		11	107		6	144		12	181		3
34		14	71	110	22	108		6	145		4	182		0
35		14	72		13	109		4	146		16	183		1
36		14	73		23	110	220	9	147		16	184	500	8
37		47	74		15	111		7	148		6	185		7