

基于蒙特卡洛的电网节点电压暂降风险分析

阐述电压暂降问题及成因, 介绍电压暂降的主要评价指标, 并指出引起电压暂降的重要原因是电网发生短路故障。基于标准化短路计算方法实现单次短路故障的节点电压暂降幅值计算, 并输出算例结果。为了定量评估电网内各节点发生电压暂降的风险, 采用蒙特卡洛法, 基于C语言程序模拟发生短路故障的几种影响因素并进行随机取样, 统计在多次随机短路故障下各节点不同电压暂降幅值的频率分布, 并进行节点电压暂降风险排序。通过程序绘制节点电压暂降概率统计图, 直观表现出电网中哪些节点受到电压暂降的影响程度较大, 对防范节点电压暂降有重要价值。

吴奇珂¹ 陈昕儒¹ 吴少臣² 程帆¹ / 1. 东南大学电气工程学院 2. 华南理工大学电力学院

0 引言

近年来, 科学技术进步推动工业设备的革新, 大量变频调速设备、自动生产线等设备被运用于社会生产中^[1]。现代生产负荷对供电电压很敏感, 一旦出现电压暂降将造成其功能失效, 导致所生产的产品质量下降, 使企业蒙受重大经济损失^[2]。

电能质量是指电网供给用户的交流电能品质, 涵盖了电流质量、供电质量和用电质量等方面^[3-4]。电压暂降 (Voltage Sag), 也称电压下跌、电压凹陷等, IEEE标准定义为工频下, 某点供电电压有效值快速下降至额定值的90%~10%且持续10 ms~1 min后恢复正常^[5]。

发生电压暂降有很多原因, 短路故障、感应电动机起动及操作刀开关等均会导致电压暂降, 其中电网内发生短路故障是引起电压暂降的主要因素。据

统计, 国内电网近年来每年累计发生约十余万次短路故障^[6]。大量短路故障会引起多次电压暂降, 导致用户损失。单次短路故障存在一定的偶然性, 不能全面表现短路故障所引起的电压暂降对电网节点的影响, 需要对不同位置可能发生的短路故障进行大量仿真, 消除单次故障仿真的偶然性, 模拟所有可能的短路故障发生时电网各节点出现的电压暂降, 帮助电网运行人员发现潜在的电网薄弱节点。加强电网电压暂降薄弱节点, 应对电压暂降问题对于改善供电质量、减少电压暂降造成的社会损失、提高电网的可靠性具有重要价值^[7]。

1 电压暂降评估指标

1.1 电压暂降程度指标

电压暂降幅值指电压发生暂降后电压幅值的大小, 文献[3]中提出以暂降电压有效值与发生暂降前电压的有效值之比作为表征电压暂降程度的参数。在实际研究中, 一般采用发生暂降后节点A、B和C三相电压幅值下降程度最大的一相为准, 并以此作为该节点电压暂降程度特征量。

具体来说, 电压暂降程度采用下式表示, 以A相为例

$$M_A = 1 - \frac{U_{A1}}{U_{A0}} \quad (1)$$

式中, U_{A1} 为发生电压暂降时A相电压有效值; U_{A0} 为电压暂降发生前A相电压的有效值。

节点电压暂降程度即以 M_A 、 M_B 和



吴奇珂/硕士研究生

关键词/Keywords

电压暂降·
短路计算·
蒙特卡洛法·
C语言·
风险分析·

M_C 三者中最大的值作为描述该节点电压暂降程度的值。

1.2 电压暂降统计指标

SARFI_x统计指数主要统计电压有效值低于阈值电压的概率,即

$$\text{SARFI}_x = \frac{\sum N_i}{N} \quad (2)$$

该式即电压低于阈值的用户数与总的用户数之比,表征电压暂降问题的影响范围。

ASTC(用户平均暂降事件次数指标)表示用户在一定时间内遭受的平均电压暂降次数^[8],即

$$\text{ASTC} = \sum_{k=1}^{N_E} \text{STC}(V_s)_k / N_E \quad (3)$$

式中, $\text{STC}(V_s)_k$ 为第 k 名用户年暂降事件次数; N_E 为系统内发生电压暂降事件用户数。

针对系统的ASTS(系统平均暂降事件次数指标)为

$$\text{ASTS} = \sum_{k=1}^{N_E} \text{STC}(V_s)_k / N \quad (4)$$

式中, N 为系统总用户数。

2 短路故障下节点电压暂降程度分析

传统的短路计算方法在计算纵向故障时需要在原网络断线处进行支路破口,这需要新增节点,修改原网络导纳矩阵,且不同元件受不同类型的故障影响也不同,不利于大规模的网络计算及计算机编程实现^[9-10]。

本文算例基于规范化短路计算程序,该方法将短路计算看作是一种网络变更情况下的稳态电流计算,适用于对称网络变更和不对称网络变更两种情况,易于大规模网络的求解。

2.1 规范化短路计算方法

如图1所示,故障线路对节点导纳矩阵的贡献用矩阵 $\mathbf{y}$ 表示,为保持原系统网络不变,并联负阻抗支路 $-\mathbf{y}$ 。 $\mathbf{I}_{\text{eq}}^{(0)}$ 为故障发生前电力系统诺顿等效电流源电流, $\mathbf{Y}_{\text{eq}}^{(0)}$ 为故障发生前电力系统诺顿等效电流源导纳。单独分析故障线路,故障后其对节点导纳矩阵的贡献用矩阵 $\mathbf{Y}_f$ 表示。

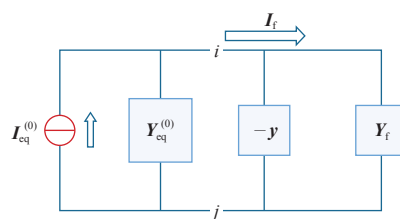


图1 故障后系统等效网络图

支路 (i, j) 对节点导纳矩阵的贡献为

$$-\mathbf{y} = - \begin{pmatrix} y_{ij} & -y_{ij} \\ -y_{ij} & y_{ij} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, $y_{ij} = z_{ij}^{-1}$ 。

故障后该支路对节点导纳矩阵的贡献为

$$\mathbf{Y}_f = \begin{pmatrix} y_{ik} & -y_{ik} \\ & y_{jk} & -y_{jk} \\ -y_{ik} & -y_{jk} & y_{\Sigma} \end{pmatrix} \quad (6)$$

星网变换消去节点 k ,得到节点 i, j 向支路看去的等效导纳,即

$$\mathbf{Y}_f = \begin{pmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{pmatrix} \quad (7)$$

电网节点导纳矩阵受影响的部分可表示为:

$$\Delta \mathbf{Y}_f = -\mathbf{y} + \mathbf{Y}_f。$$

模拟短路故障接入的补偿支路电流为

$$\Delta \mathbf{I}_f = \Delta \mathbf{Y}_f (\mathbf{Y}_{\text{eq}} + \Delta \mathbf{Y}_f)^{-1} \mathbf{I}_{\text{eq}}^{(0)} \quad (8)$$

故障后电网各节点电压的解析式为

$$\dot{V} = \dot{V}^{(0)} - \mathbf{Z}_f \Delta \mathbf{I}_f = \dot{V}^{(0)} - \mathbf{Z}_f [\Delta \mathbf{Y}_f (\mathbf{Y}_{\text{eq}} + \Delta \mathbf{Y}_f)^{-1} \mathbf{I}_{\text{eq}}^{(0)}] \quad (9)$$

式中, $\mathbf{Z}_f$ 为原始网络节点阻抗矩阵中和节点 i, j 相对应的列组成的 $N \times 2$ 阶矩阵。

2.2 算法流程

短路计算求解节点电压暂降流程如图2所示,主要计算步骤如下。

- 1) 读入数据。读入电网相关数据,并进行处理。
- 2) 潮流计算。完成电网非故障条件下潮流计算,计算出各节点电压及功率分布。
- 3) 求解故障端口的诺顿等效电路。计算故障端口诺顿等效电路 $\mathbf{I}_{\text{eq}}^{(0)}$ 、 $\mathbf{Y}_{\text{eq}}^{(0)}$ 、 $\Delta \mathbf{Y}_f$ 等相关参数。
- 4) 求解故障端口的等效网络模型。求解等效网络模型,求解补偿支路电流 $\Delta \mathbf{I}_f$ 。
- 5) 计算故障后各节点电压。

- 6) 分析各节点电压暂降情况，并统计。
- 7) 输出结果。输出全网各节点电压暂降幅值数据。

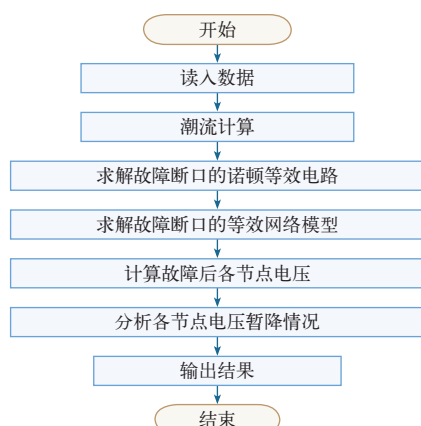


图2 短路计算求解节点电压暂降流程图

2.3 算例分析

2.3.1 IEEE-14网络

采用IEEE-14网络进行单次线路故障下的短路计算，以验证模型正确性。首先进行潮流计算，得出各节点在短路故障发生前的各相电压值，设置在节点8和节点7之间80%长度的位置出现A相单相金属性接地故障，得到短路故障后各节点电压暂降幅值，如表1所示。

表1 IEEE-14节点网络单次故障节点电压暂降幅值统计

节点编号	单次故障节点电压暂降幅值
1	0.003 98
2	0.002 28
3	0.001 58
4	0.013 66
5	0.010 24
6	0.108 24
7	0.000 00
8	0.186 11
9	0.237 00
10	0.276 16
11	0.105 65
12	0.090 13
13	0.115 46
14	0.126 59

根据上文单次故障节点电压暂降绘制图示如图3所示，三角形所处位置为短路故障发生位置，

浅灰色圆形标注节点（1~5、12节点）为未达到电压暂降，灰色圆形标注节点（6、11、13和14节点）为电压暂降幅值在10%~15%之间，深灰色圆形标注节点（8~10节点）为电压暂降幅值超过15%。矩形标注节点（7节点）为发生电压暂升，并未发生电压暂降。

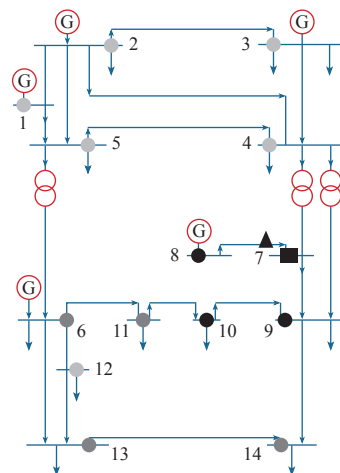


图3 IEEE-14节点网络单次故障节点电压暂降程度图示

取10%作为电压暂降幅值阈值，可得出该故障下SARFI_x指标等于50%。由上文及图示可知，在该单相接地短路故障下，除7节点发生电压暂升外，其余与之相近的节点均有较大幅度的电压暂降，且距离故障位置较远、距离远端电源较近的节点相对受到的影响较小，而与故障节点关联较紧密且距离电源较远的节点会受到较大影响。

2.3.2 IEEE-118网络

采用IEEE-118网络，当设置节点54~55线路64%位置处发生B相单相金属性接地故障，得到短路故障后各节点各相电压变化量，各节点电压暂降幅值如表2所示。

表2 IEEE-118节点网络单次线路短路故障电压暂降幅值（大于6%）节点统计

节点编号	单次短路故障节点电压暂降幅值
55	0.121 33
44	0.113 87
54	0.111 87
10	0.098 86

(续)

节点编号	单次短路故障节点电压暂降幅值
45	0.095 35
53	0.095 26
9	0.089 52
56	0.089 33
52	0.082 79
8	0.078 98
51	0.072 76
46	0.072 00
81	0.070 58
60	0.070 51
67	0.069 36
43	0.064 04
62	0.062 87
116	0.062 87

如图4所示,节点55与节点54之间出现单相相接

地故障,仅有三个节点(44、54和55节点)电压暂降幅值超过10%,且并未超过15%,其余未标注节点均未达到电压暂降定义中的幅值区间。其中两个节点即距离故障最近的54和55节点,远端的44节点也出现了电压暂降情况,说明远处发生的短路故障同样可能引起电压暂降。取10%作为电压暂降幅值阈值,得出该故障下SARFI_x指标为2.54%,与14节点网络相比该指标较小,可见大型网络中受单次故障电压暂降影响的节点相对于小型网络较少。

3 节点电压暂降风险分析

3.1 节点电压暂降风险分析方法

目前电压暂降分析主要有实测统计法和随机

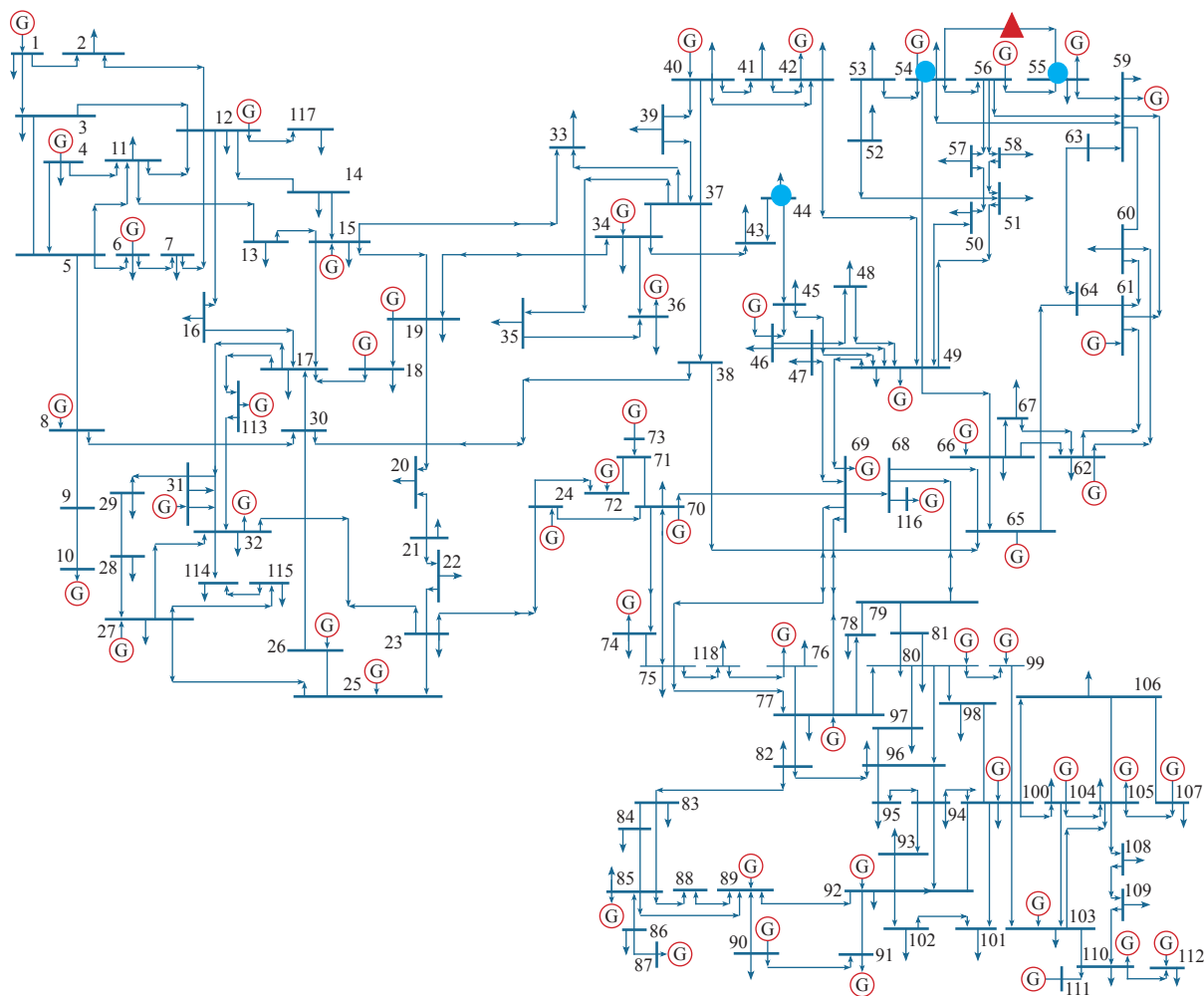


图4 IEEE-118节点网络单次故障节点电压暂降程度图示

预估法两类方法。随机预估法将故障的发生视为随机事件,通过建立数学模型从理论上预估由故障导致电压暂降的统计特征。随机预估法能够弥补实测统计法置信度不高、局限性大及耗时长等缺陷,因此随机预估法比实测统计法得到的结果更为科学合理,是一种十分有效的替代方法^[11-13]。

蒙特卡洛法是基于概率和统计理论的一种随机预估方法^[14-15]。蒙特卡洛法的优点在于能反映系统的随机特性,可以克服实测法缺陷。该方法采样次数与系统大小无相关性^[16-18],对于难以正向理论研究的体系,可以通过多次随机模拟预估出可能结果,且适合计算机计算,因此在进行大型网络电压暂降分析时其优势明显。

蒙特卡洛法主要思路:分析影响因素特征,建立随机变量概率模型,而后进行大量的随机抽样,并对生成的结果进行统计分析,得出所求问题的特性。

3.2 基于蒙特卡洛法的节点电压暂降风险分析

3.2.1 算法流程

基于蒙特卡洛法的节点电压暂降计算流程如图5所示。

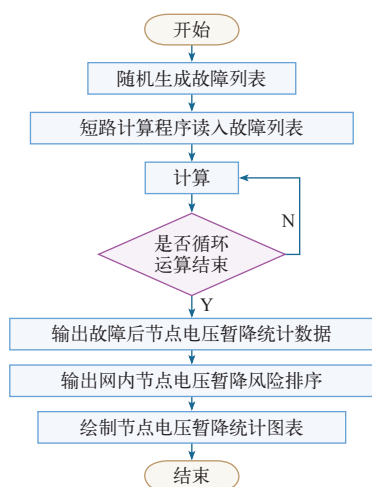


图5 基于蒙特卡洛法的节点电压暂降计算流程图

1) 随机生成故障列表。C语言编程^[19-22]实现对故障线路、故障位置和故障类型等随机变量在给定的范围内进行随机抽样,重复进行 N 次,并按照一定规律生成故障信息列表。

2) 短路计算程序读入故障列表。计算程序读入随机故障列表并进行短路计算。

3) 是否循环结束。判定是否计算完毕,若否则继续进行,若是则终止短路计算程序,并将 N 次随机故障下各节点电压暂降幅值等参数输出。

4) 输出故障后节点电压暂降统计数据。根据 N 次故障随机抽样的结果,统计各节点不同电压暂降幅值的概率分布。

5) 输出网内节点电压暂降风险排序。统计网内节点电压暂降风险程度并排序,输出统计文件。

6) 绘制节点电压暂降统计图表。编程绘制网内节点电压暂降幅值概率统计图。

3.2.2 随机变量的生成

导致电压暂降的原因有很多,最主要的原因是发生短路故障,上文所述的节点电压解析式中,只要确定 ΔY_r 即可算出节点电压,且 ΔY_r 仅与 y_{ik} 、 y_{jk} 和 Y_r 有关。

令 L_{ij} 为节点 i 、 j 间线路的长度,变量 λ 为故障点到节点 i 的距离,故障点到节点 j 的距离为 $L_{ij}-\lambda$, z 为线路单位长度阻抗值,则

$$y_{ik} = (\lambda z)^{-1} \quad (10)$$

$$y_{jk} = [(L_{ij} - \lambda)z]^{-1} \quad (11)$$

把 y_{ik} 和 y_{jk} 代入节点电压解析式,则任一节点 x 电压可表示为

$$\dot{V}_x = \dot{V}_x^{(0)} - f\left(\frac{1}{\lambda}, \frac{1}{L_{ij} - \lambda}\right) \quad (12)$$

由上式可知,影响节点电压的因素有:①线路(一般与长度 L_{ij} 有关);②短路点位置(即变量 λ);③短路类型(不同短路类型下, Y_r 的形式不同)。

因此,本文将短路发生的故障线路、故障位置及故障类型等作为纳入蒙特卡洛法考虑的随机变量。

令线路 L_{ij} 发生短路故障的概率为 $P(L_{ij})$,故障参数往往是随机的,其概率用 $P(X)$ 表示,其中 X 表示不同的故障类型,节点电压的概率可表示为线路短路概率、短路故障类型概率以及节点电压条件概率的乘积和,即

$$P(V_{j0}) = \sum P(V_{j0} | X, L_{ij}) P(X) P(L_{ij}) \quad (13)$$

(1) 短路故障线路选定

基于各段线路的长度占线路总长的比例作为该段线路发生故障的概率, 即

$$P_{ln} = \frac{l_n}{\sum_{i=1}^N l_i} \quad (14)$$

式中, l_n 为第 n 条线路长度; $\sum_{i=1}^N l_i$ 即为 1 ~ N 条线路总长度。

(2) 短路故障位置选定

本文认为故障线路内各点发生故障的概率均相同, 即从线路首端至线路尾端, 各位置发生短路故障的概率满足 $s \sim (0, 1)$ 均匀分布, s 即为从线路首端至故障位置长度占线路总长百分比。

(3) 短路故障类型选定

本文研究的短路故障有单相接地短路 (A、B 和 C 相)、两相接地短路 (AB、AC 和 BC 相)、两相短路 (AB、AC 和 BC 相) 以及三相短路和三相接地短路共 11 种情况, 对于不同故障类型一般有不同的故障概率, 可以参照历史数据或采用经验值。

为了深入研究电压暂降影响因素对电网节点电压的影响, 可调整线路故障概率, 得到多组电压暂降幅值数据并对比分析。当某线路故障概率小幅变化可导致节点电压发生较明显变化, 则可确定该线路为电网的薄弱线路, 需进行治理。

3.2.3 随机生成故障列表

(1) 生成基于各线路电抗的随机故障线路号

基于上文的分析, 线路发生故障的概率与该条线长有关, 本文基于各段线路电抗值, 假定各段线路每公里电抗值相等, 以此推算各段线路长度。式 (14) 中的概率由线长表示, 各项均乘以单位长度的线路电抗值, 即

$$P_{ln} = \frac{l_n \rho}{\sum_{i=1}^N l_i \cdot \rho} \quad (15)$$

式中, l_n 为第 n 条线路长度, $\sum_{i=1}^N l_i$ 即为从 1 ~ N 条线

路总长度; ρ 为单位长度线路电抗值。

$$\text{故障线路号} = \begin{cases} 1 & 0 \leq t_1 \leq \Theta_1 \\ m & \Theta_{m-1} \leq t_1 \leq \Theta_m \\ \vdots & \\ N & \Theta_{N-1} \leq t_1 \leq \Theta_N \end{cases} \quad (16)$$

取当前计算机系统的时间作为随机数种子, 使结果具有随机性, 生成 $[0, 1]$ 的任一双准确度小数。

Θ_m 则是通过将线路原始参数字符数组中各线路的电抗值读入并转化为数值形式存储在数组中, 统计出所有线路电抗值之和, 最后算出各线路概率区间的 Θ_{m-1} 及 Θ_m , 形成具有 $N+1$ 个元素的数组。

在每次随机抽样 (程序循环) 中生成一个随机数 t_1 , 通过比较随机数 t_1 与任一区间内 Θ_{m-1} 及 Θ_m 的大小关系即可确定故障线路, 当满足 $\Theta_{m-1} \leq t_1 \leq \Theta_m$ 时则认为随机故障发生在第 m 条线路上。

(2) 生成故障类型及故障位置随机数

依据上文所述故障类型共计有 11 种。设随机数 t_2 表示故障类型, 则 t_2 即为 $[1, 11]$ 内任一整数。为了表示不同故障发生的概率不同, 生成 $0 \sim 1$ 之间的数据区间表示概率分布, 随机生成 $[0, 1]$ 的任一双准确度小数, 判断该小数位于哪一个区间即可表示故障生成类型。基于历史数据设置不同故障的发生概率, 并生成故障类型概率区间, 对于不同地点及季节, 可对参数进行修改。故障位置随机数 t_3 则是在 $(0, 1)$ 区间的两位小数, 采用随机数语句实现。

(3) 随机故障仿真

将生成的随机故障线路号、故障类型随机数及故障位置随机数所对应的故障信息依次输出, 并将 N 次随机故障的故障列表读入短路程序, 每进行一次计算可得出该节点在随机短路故障发生前后各节点的 A、B 和 C 三相电压值以及变化量, 将这些数据输出到数据文件, 当故障列表中的 N 次随机故障全部读入运算完毕时, 程序以数据文件形式输出各节点在 N 次随机故障下 A、B 和 C 三相故障前电压、故障后电压以及各相电压变化量。

3.2.4 数据处理及统计

将随机故障下各节点A、B和C三相故障前电压、故障后电压以及各相电压变化量等信息进行处理,计算出各节点电压暂降程度,并以百分比表示。共进行了 N 次随机故障的电压暂降仿真,可以统计出每个节点受到随机故障影响的电压暂降幅值百分比分布情况,据此可得电网内各节点受短路故障影响的电压暂降风险程度。具体步骤如下。

(1) 短路计算数据处理

针对 N 次随机故障下各节点A、B和C三相故障前电压、故障后电压以及各相电压变化量进行处理,找出单次随机故障下该节点三相中电压暂降幅值最高的一相,并将该相数值作为反映该节点电压暂降幅值的特征量进行存储,重复进行 N 次,得到该节点 N 个随机故障电压暂降特征量。

(2) 划分暂降幅度区间并统计

依照一定间隔划分区间,对该节点 N 个电压暂降特征量进行统计,统计出各区间内的频数、频率等参数,并输出数据。

(3) 全网节点电压暂降风险排序

基于 N 次随机故障下各节点电压暂降幅值数据,统计全网内所有节点在 N 次随机故障下出现电压暂降的次数,可对全网节点进行排序,判断电网内各节点电压暂降风险程度并进行分级。

(4) 输出节点电压暂降幅度统计图

通过图形程序框架输出数据统计图表,可以直观判断该节点受到电压暂降的影响程度,系统中多个节点也可进行比较,判断哪些节点发生电压暂降受网内随机短路故障的影响较大,便于对敏感节点采取措施。

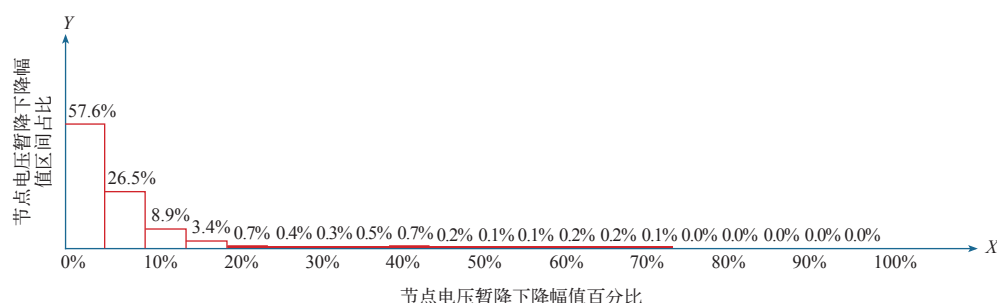


图6 IEEE-14网络8节点电压暂降幅值柱状图

3.3 算例分析

3.3.1 IEEE-14节点网络

采用IEEE-14节点网络,随机生成10 000次随机故障,统计各节点电压暂降次数如表3所示,进行统计排序并通过程序绘图输出如图6所示。

表3 IEEE-14网络10 000次随机故障节点电压暂降次数统计结果

排序后的节点序号	发生电压暂降次数	发生电压暂降概率
8	1 588	0.158 8
14	892	0.089 2
10	624	0.062 4
12	579	0.057 9
11	569	0.056 9
13	415	0.041 5
9	335	0.033 5
6	330	0.033 0
7	245	0.024 5
3	230	0.023 0
4	111	0.011 1
2	92	0.009 2
1	80	0.008 0
5	0	0.000 0

受篇幅所限,本节未将所有节点列出,通过各节点的电压暂降幅值比较可见大部分节点在随机短路故障发生情况下电压暂降的幅值并不大,基本保持在0%~5%之间,但有少部分节点电压暂降幅值超出10%,依据电压暂降定义,此时即认为发生了电压暂降。例如节点8出现电压暂降的概率大,需要采取应对措施防范电压暂降,而对于节点3(具体数据未列出)则遭受电压暂降的可能性较小,且一般电压暂降幅值不大,除非有极敏感负荷,否则可以不采取措施。

参照上文电压暂降统计指标,得出:ASTC=

$6\ 090/13=468.46$, $ASTS=6\ 090/14=435$ 。

3.3.2 IEEE-118节点网络

为了满足大型城市电网仿真统计的需要,采用IEEE-118节点网络,随机生成10 000次随机故障进行统计运算,得到以下结果如表4所示。

表4 IEEE-118网络10 000次随机故障节点电压暂降次数统计结果

(单位: %)

电压暂降幅度	所占比例	发生该型电压暂降概率
5以下	79.0	11.455
5~10	6.4	0.928
10~15	4.6	0.667
15~20	3.1	0.450
20~25	1.7	0.247
25~30	1.6	0.232
30~35	1.2	0.174
35~40	0.8	0.116
40~45	0.4	0.058
45~50	0.4	0.058
50~55	0.2	0.029
55~60	0.2	0.029
60~65	0.1	0.015
65~70	0.1	0.015
70以上	0.2	0.029

由程序输出结果,大约80%的随机短路故障发生所造成的电压暂降幅值在0%~5%以内,即网内节点在大部分随机故障下受到的影响较小,但依然会受到某些短路故障的冲击,如图7所示,87节点出现暂降幅达70%以上,少数条件下甚至超过90% (发生电压中断),在这种情况下必然会造成与之相连的敏感负荷不正常工作,虽然概率相对较小,但是单次短路故障亦会造成严重的后果,因此需要对87节点的敏感负荷采取必要措施,而如图8所示,86节点则相对风险略低于87节点。

从统计图的趋势看,电压暂降风险大的节点往往分布更为均匀,折线图曲线较平缓,表明不同幅度的电压暂降均有分布,而电压暂降风险小的节点往往集中分布在较小的暂降幅值区间内,大幅度的电压暂降一般较少发生,折线图曲线也更陡,相应的风险程度也较低。

参照电压暂降统计指标,得出: $ASTC=37\ 635/118=318.94$ 。

对比与IEEE-14节点该数值相对较小,说明大型网络中各节点平均暂降次数较少,反映出较大型系统对短路故障造成电压暂降的抵御能力相对

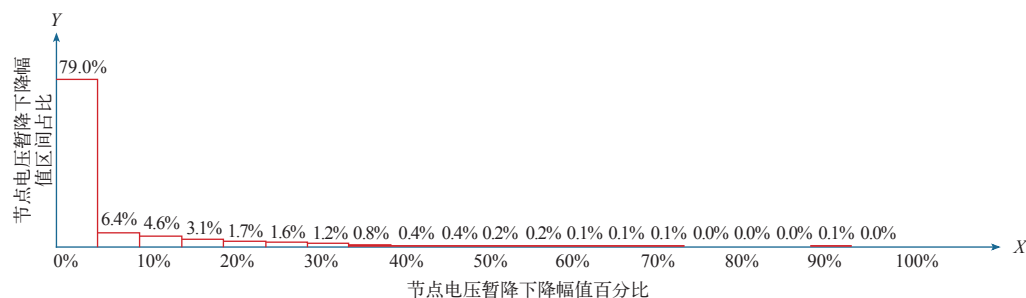


图7 IEEE-118网络87节点电压暂降幅值统计图

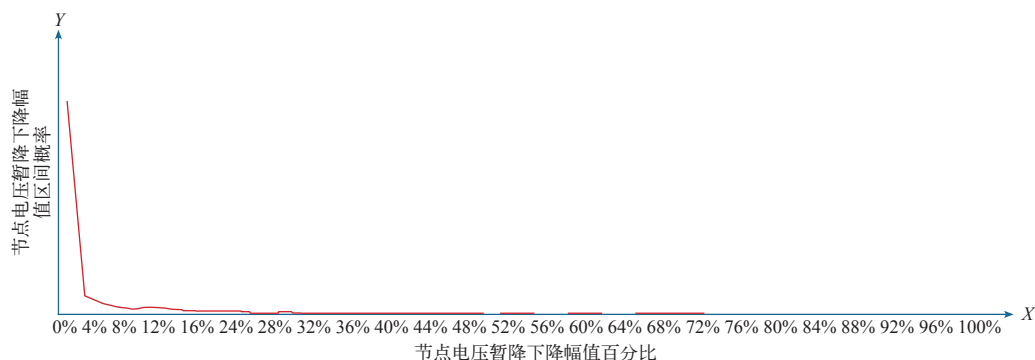


图8 IEEE-118网络86节点电压暂降幅值折线图

较强,但对于某些节点需重点进行电压暂降治理。

4 结束语

本文简要介绍电压暂降的定义、主要产生原因及评估指标,指出电网内发生短路故障是造成电压暂降的重要原因。基于标准化短路计算方法,计算单次短路故障的节点电压暂降幅值并输出算例结果。为了反映电网中节点因短路故障造成电压暂降的影响程度,运用蒙特卡洛法模拟发生短路故障的位置、线路及故障类型等因素并进行随机取样,统计在多次随机短路故障下各节点不同电压暂降幅值的频率分布,并进行节点风险排序,通过程序绘制节点电压暂降概率统计图。仿真结果表明大型电网对短路故障引起的电压暂降抵御能力较小型电网更强,但存在远离故障的节点发生电压暂降的可能性,需要通过仿真分析电网内节点电压暂降风险。

本文所述分析方法可对多个造成电压暂降的电网短路故障的影响因素进行模拟抽样,输出各节点在大量随机故障下电压暂降的幅值下降程度统计图,从而判断电网内易受电压暂降影响的节点,对于大规模电网节点电压暂降的防范具有实践意义。此外,该算法还可做适当修改,进行影响因素的灵敏度分析,判断出哪些因素可对节点电压暂降幅值影响较大,指导电网规划建设。

参考文献

- [1] 徐忠. 现代电能质量的主要问题及其对策 [J]. 四川电力技术, 2004 (5): 60-62.
- [2] 任春萌. 电压暂降对电能质量的影响 [J]. 供用电, 2008, 25 (1): 61-64.
- [3] 程浩忠, 艾芊, 张志刚, 等. 电能质量概论 [M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [4] 肖湘宁, 等. 电能质量分析与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [5] 荣彩霞, 熊丽霞. 电压暂降问题及其抑制方法 [J]. 江西电力, 2006, 30 (6): 21-23.
- [6] 张慧. 考虑电压暂降及短时中断的供电可靠性研究 [D]. 济南: 山东大学电气工程学院, 2010.
- [7] Martinez Juan A, Jacinto Martin-Arnedo. Voltage sag stochastic prediction using an electromagnetic transients program [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19 (4): 1975-1982.
- [8] 代双寅. 电压暂降随机预估研究与软件开发 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [9] 张伯明, 杨健. 一种规范化的计算机故障分析计算方法 [J]. 清华大学学报, 1995, 35 (1): 32-38.
- [10] 孟祥萍, 等. 电力系统分析 [M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [11] 周林, 等. 电压暂降分析方法研究 [J]. 高电压技术, 2008, 34 (5): 1010-1016.
- [12] 王强. 电压骤降的概率评估和仿真研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [13] 林海雪. 电力系统中电压暂降和短时断电 [J]. 供用电, 2002, 19 (1): 9-13.
- [14] 钟庆, 易杨. 电力用户电压暂降问题分析与仿真 [J]. 电力系统及其自动化学报. 2008, 20 (6): 102-106.
- [15] 刘亚成, 丁明. 概率短路计算的蒙特卡罗仿真 [J]. 合肥工业大学学报, 1999, 22 (1): 66-71.
- [16] 易杨, 张尧. 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.
- [17] 许丹. 基于蒙特卡洛法的电压骤降评估方法的研究 [D]. 济南: 山东理工大学, 2012.
- [18] 杨晓东, 李庚银, 周明, 等. 不确定条件下的电压暂降概率评估 [J]. 电网技术, 2010, 34 (2): 41-45.
- [19] Gabriel Olguin, Ferruccio Vuinovich, Bollen Math H J. An optimal monitoring program for obtaining voltage sag system indexes [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (1): 378-384.
- [20] 谭浩强. C程序设计 [M]. 4版. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [21] 谭浩强. C++程序设计 [M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [22] 周霭如, 徐红云, 黄小兵. C++程序设计基础 (下) [M]. 4版. 北京: 电子工业出版社, 2013.

(收稿日期: 2016-03-01) **EA**