

考虑系统峰谷时变区间特性的电压暂降频次评估

张 忠¹ 徐培栋²

(1. 四川省电力公司超(特)高压运行检修公司, 四川 成都 610065;

2. 江苏省电力公司检修分公司无锡分部, 江苏 无锡 214000)

摘要: 故障前电压是影响系统电压暂降频次评估的重要原因之一。现有电压暂降频次随机评估方法, 通常假定发生故障前系统母线电压为额定值, 而实际故障前电压在电压曲线区间范围内变化, 且不同运行方式下随着峰谷变化有不同区间边界。针对故障前电压实际特征, 建立故障前电压的数学模型——幅值区间矩阵和时间权重重点值矩阵, 体现了故障前电压峰谷、时变、区间三大特征。在此模型基础上提出用区间分析的方法评估电压暂降频次的一般步骤。通过对实际区域电网仿真分析, 并与故障前电压为额定值和实际截面电压评估结果比较, 证明了该模型和算法的正确性和有效性。采用提出方法对电压暂降进行评估, 更符合工程实际。

关键词: 电压暂降; 区间算法; 故障前电压; 幅值区间矩阵; 时间权重重点值矩阵; 随机评估

Abstract: Prefault voltage is one of the most important factors which will affect the assessment of voltage sag frequency in power system. The current stochastic assessment methods usually assume the prefault voltage to be the rated value. In practice, however, the prefault voltage is varying over a range. The range is always changing during peak and valley period everyday under different operating modes. Aiming at the characteristics mentioned above, a mathematical model of the prefault voltage is established with the interval matrix of voltage magnitude and the time weighted matrix, which reflects the three characteristics, that is, peak-valley, time-varying and interval. For the typical characteristics of the prefault voltage, the common process to assess the voltage sag frequency is proposed in detail on the basis of interval algorithm. The proposed method is performed in the actual power grid. It is proved that it needs only one time of interval iteration process. The simulation results indicate that this method is reasonable and effective.

Key words: voltage sag; interval algorithm; prefault voltage; interval matrix of voltage magnitude; time weighted matrix; stochastic assessment

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0015-06

0 引言

随着电力系统中敏感负荷的增多, 因电压暂降引起的经济损失越来越大^[1,2], 电压暂降已成为最严重的电能质量问题, 引起了国内外广泛关注^[3,4]。系统故障是引起电压暂降最主要原因^[5,6]。因此准确评估系统电压暂降频次成了迫切需要研究的重要课题。

现有评估方法: 实测法^[7]、临界距离法^[8]、故障点法^[9,10]、解析式法^[11-13]。实测法的结果直观、可靠, 但测试成本高, 所需时间长, 推广性和预见性不强; 后面3种方法属较典型的随机估计法, 以仿真建模为基础进行评估, 有较强的预见性和推广性; 但现有方法几乎均假设发生暂降前系统母线电压为额定

值, 而实际中, 随着系统运行方式和负荷水平的变化, 系统母线电压总在运行规程允许的范围内变化, 这种变化虽然相对发生停电事件很小, 但对于评估可能造成敏感负荷设备不正常运行的电压暂降频次的影响很大, 因此, 评估电压暂降频次时, 故障前母线电压必须考虑。

影响电压暂降频次的因素很多, 包括故障前电压^[13]、网络拓扑、运行方式^[14]、线路故障率^[15,17]、故障位置^[15,16]等。现有评估方法在评估频次时, 通常假定故障前各母线电压为额定值^[8-12], 文献[13]提出用某一潮流截面计算后的母线电压作为暂降前电压, 这些对故障前电压的刻画均与实际不符。系统每年均对重要母线制定电压运行曲线, 各母线电压均在该电压曲线区间范围内波动^[21], 这说明正常运行时, 各母线的运行边界具有时变特性。当某变量

的具体值不能精确知道而仅知道其界定范围,或本身是一区间值而非点值时,用区间数分析更合理^[17-19]。文献[17-19]通过建立负荷及元件的区间模型,通过前推回代计算母线电压区间范围,但区间模型建立困难,其推广性不强。

由于在系统不同运行方式下,随着峰谷的变化,母线电压的变化具有区间时变特性,下面用幅值区间矩阵和时间权重点值矩阵,建立故障前母线电压模型,以确定不同运行方式和负荷水平下暂降前的母线电压,以此为依据确定发生故障时母线电压暂降幅值,通过区间分析法评估母线电压暂降频次。以某地区级实际区域电网为例,并与故障前电压为 1 p. u. 和实际截面电压的评估结果比较,验证该方法的有效性和正确性,采用所提方法对电压暂降进行评估,更符合工程实际,评估结果为决策者提供了更加充分的决策信息。

1 区间数与区间运算

区间估计法利用区间数学和区间分析法来处理外延明确、内涵不明确的信息,即只知道变化范围而不知其确切的信息。

对给定数,对 $x_d, x_p \in R, R$ 为实数域,若满足条件 $x_d \leq x_p$, 则闭有界数集合为

$$\tilde{X} = [x_d, x_p] = \{x \in R \mid x_d \leq x \leq x_p\} \quad (1)$$

称为有界闭区间数^[18]。其中 x_d, x_p 分别为区间数 \tilde{X} 的上下端点。

若 $x_d = x_p$, 则定义 \tilde{X} 为点区间数,将实数域 R 上所有的有界闭区间数的集合记为 $I(R)$ 。对任意给定区间数 $\tilde{X} = [x_d, x_p], \tilde{Y} = [y_d, y_p] \in I(R)$, 其四则运算为

$$\tilde{X} + \tilde{Y} = [x_d + y_d, x_p + y_p] \quad (2)$$

$$\tilde{X} - \tilde{Y} = [x_d - y_p, x_p - y_d] \quad (3)$$

$$\tilde{X}\tilde{Y} = [\min(x_d y_d, x_d y_p, x_p y_d, x_p y_p), \max(x_d y_d, x_d y_p, x_p y_d, x_p y_p)] \quad (4)$$

$$\tilde{X}/\tilde{Y} = [x_d, x_p] [1/y_d, 1/y_p] \quad 0 \notin \tilde{Y} \quad (5)$$

为便于表达,以 \tilde{X} 表示区间数,以区别于普通的点值。

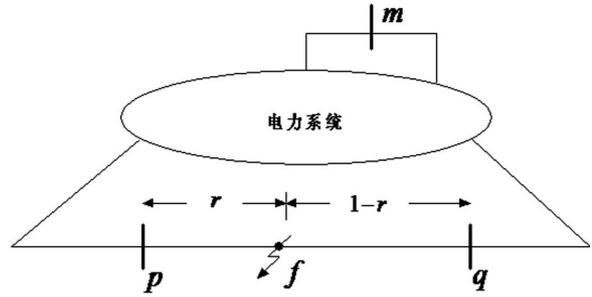


图 1 线路 $p-q$ 上 f 点发生故障

2 电压暂降幅值计算

假定线路 $p-q$ 上 f 点处发生短路故障,故障点 f 到母线 p 的距离为 $r, 0 \leq r \leq 1$ (标么值 p. u.)。故障点 f 对敏感负荷接入母线 m 的互阻抗和自阻抗分别为^[13]

$$Z_{mf}^k = (1-r) Z_{mp}^k + r Z_{mq}^k \quad (6)$$

$$Z_{ff}^k = (1-r)^2 Z_{pp}^k + r^2 Z_{qq}^k + 2r(1-r) Z_{pq}^k + r(1-r) z_{pq}^k \quad (7)$$

式中 $k=0, 1, 2$ 分别表示零序、正序和负序; $Z_{pp}^k, Z_{qq}^k, Z_{mm}^k$ 为母线 p, q, m 的自阻抗; $Z_{mp}^k, Z_{mq}^k, Z_{pq}^k$ 为各母线的互阻抗; z_{pq}^k 为线路 $p-q$ 的阻抗。

故障点 f 故障前的电压幅值为

$$V_f^{pf} = (1-r) V_p^{pf} + r V_q^{pf} \quad (8)$$

式中 V_p^{pf} 和 V_q^{pf} 为母线 p, q 故障前的电压幅值。

以三相短路故障为例说明,母线 m 的电压幅值与故障距离 r 的解析表达式为

$$V_m = V_m^{pf} - \frac{Z_{mf}^1}{Z_{ff}^1} V_f^{pf} \quad (9)$$

当线路发生其他类型短路故障时,母线电压暂降幅值与故障距离的解析式这里就不赘述。

3 故障前电压不确定性

3.1 故障前电压对电压暂降幅值的影响

电压是保证电能质量的重要指标。为保证用户安全生产和电网安全运行,电力系统各级母线和用户受端电压都是在规定允许偏差值内。由公式(8)、(9)知道,母线 m 故障后电压暂降幅值受到母线 m, p, q 故障前电压的影响。为说明故障前电压波动对电压暂降幅值的影响,以文献[12]中 5 节点系统为例说明。

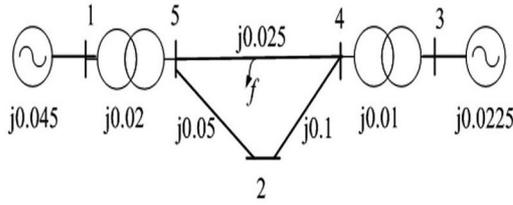


图2 5节点系统

传输线2-5在0.5 p. u. 位置 f 点发生三相短路故障,假定母线2、4、5均为10 kV 母线。由文献[21]知,母线3、4、5故障前电压可在系统额定电压内变化,则故障点 f 故障前电压也在 $[0.93, 1.07]$ p. u. 区间内变化。由公式(9)画出母线2故障后电压关于故障点 f 和母线2故障前电压三维关系图。如图3 随着母线2和故障点 f 故障前电压在 $[0.93, 1.07]$ p. u. 的电压区间内变化,母线2故障后的电压在 $[0.0567, 0.311]$ p. u. 的电压区间内变化,因此正确客观刻画故障前电压对提高电压暂降幅值评估的精确度和客观性有着重要意义。

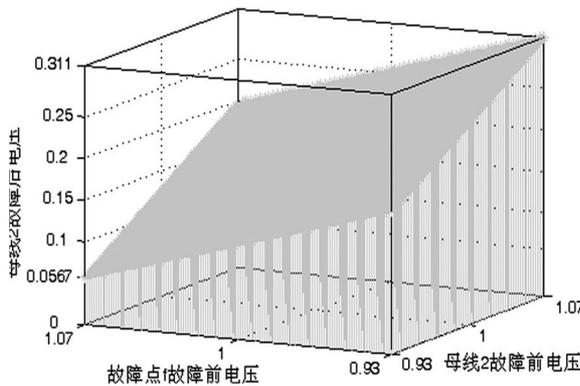


图3 母线2故障后电压三维图

3.2 故障前电压数学模型

国家《电力系统电压和无功电压管理条例》规定如下。

- (1) 电力系统各级网络,必须符合电压允许偏差值的要求(特殊负荷电压偏差由供电合同规定)。
- (2) 在电压偏差内实现逆调压,即供电电压在电网负荷高峰和低谷时段有不同的电压偏移要求。
- (3) 不同运行方式下(负荷变化、发电方式变化等)制定不同的电压曲线。

这说明系统不同运行方式(负荷变化、发电方式变化)下,随着峰谷的变化,母线电压的变化具有区间时变特性。由此首先建立故障前电压的幅值区间矩阵为

$$\tilde{V}_{n \times 2m} = \begin{bmatrix} \tilde{V}_{11} & \tilde{V}_{12} \\ \dots & \dots \\ \tilde{V}_{j1} & \tilde{V}_{j2} \\ \dots & \dots \\ \tilde{V}_{n1} & \tilde{V}_{n2} \end{bmatrix}$$

其中 n 表示提前制定的电压曲线套数; $1 \leq j \leq n$ 表示第 j 套电压曲线; m 表示电网实际节点总数;矩阵所有元素均为区间数; $\tilde{V}_{j1} = [\tilde{V}_{j1}, \tilde{V}_{j2}, \dots, \tilde{V}_{jm}]$ 表示第 j 套电压曲线峰期各节点电压幅值区间数矩阵; $\tilde{V}_{j2} = [\tilde{V}_{g1}, \tilde{V}_{g2}, \dots, \tilde{V}_{gm}]$ 表示第 j 套电压曲线谷期各节点电压幅值区间数矩阵。

$\tilde{V}_{n \times 2m}$ 只是刻画了故障前电压幅值峰谷、区间特性,并没有反应故障前电压时变特征。随着每天峰谷变化,每年运行方式变化,系统母线电压区间边界均在变化,由此建立了时间权重点值矩阵为

$$w_{n \times 3} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} \\ \dots & \dots & \dots \\ w_{j1} & w_{j2} & w_{j3} \\ \dots & \dots & \dots \\ w_{n1} & w_{n2} & w_{n3} \end{bmatrix}$$

其中 w_{j1} 、 w_{j2} 、 w_{j3} 表示第 j 套电压曲线峰期权重系数、谷期权重系数、全年权重系数。

$$w_{j1} = j \text{ 套电压曲线每天峰期持续小时} \quad (10)$$

$$w_{j2} = j \text{ 套电压曲线每天谷期持续小时} \quad (11)$$

$$w_{j3} = j \text{ 套电压曲线每年运行天数} \quad (12)$$

系统中,母线电压运行曲线方式由调度部门提前下达,根据下达曲线经过简单计算即可建立故障前电压的数学模型——幅值区间矩阵和时间权重点值矩阵。

4 电压暂降幅值与频次区间计算

4.1 电压暂降幅值区间计算

临界距离法仅适用于辐射型电网;解析式法当故障前电压为区间数时,反复迭代会造成区间扩大并且会出现不收敛的情况;故障点是通过在系统中设置故障点,短路分析计算研究母线故障后的电压来确定凹陷域和电压暂降频次。当故障前电压为区间数时,只需一次简单区间加减乘除运算计算得到故障后电压的电压幅值区间,从而确定暂降频次区

间,由此这里选择了故障点法。

以图1中*f*点发生单相接地故障,且故障前电压均为区间数为例说明如下。

故障点*f*故障前电压幅值区间数表示为^[13]

$$\tilde{V}_f^{pf} = (1-r)\tilde{V}_p^{pf} + r\tilde{V}_q^{pf} \quad (13)$$

母线*m*故障后电压幅值区间数与故障点距离的解析式为

$$\tilde{V}_m = \tilde{V}_f^{pf} - \frac{Z_{mf}^0 + Z_{mf}^1 + Z_{mf}^2}{Z_{ff}^0 + Z_{ff}^1 + Z_{ff}^2} \tilde{V}_f^{pf} \quad (14)$$

其他故障类型类似,由公式(13)、(14)计算出的故障后电压不再是一个点值,而是反映故障前电压波动的一个区间数。

4.2 电压暂降频次区间计算

故障点法是通过在每条线路上设置故障点把线路分成多个区间段,用短路分析计算故障点发生指定故障类型时,研究母线电压幅值与给定耐受电压幅值的关系。如果母线电压幅值小于等于给定耐受电压幅值,则线路区间段在凹陷域内,反之则在凹陷域外。由4.1节可知,当故障前电压在一个区间内变化时,母线故障后的电压幅值也在一个区间内变化。对于给定的耐受电压值,故障后电压会出现以下3种情况。

(1) 当故障后电压值区间最大值小于等于 V_{th} , 则设置故障点对应的距离区间在凹陷域内。

(2) 当故障后电压值区间最小值大于 V_{th} , 则设置故障点对应的距离区间在凹陷域外。

(3) 当 V_{th} 落在故障后电压值区间内, 则设置故障点对应的距离区间不确定是否落在凹陷域内。

由此,每条线路对于给定耐受电压幅值的凹陷域随着故障前电压的波动,也在一个区间内变化,用区间数 $\tilde{l} = [l_s, l_s + l_{us}]$ 来表示。 l_s 表示肯定会产生电压暂降距离长度; l_{us} 表示不确定会产生电压暂降距离长度。

假设各条线路上故障点服从均匀分布,不考虑发电计划的影响,故障前电压为区间数矩阵 \tilde{V}_{j1} , 则第*j*套电压曲线峰期,母线*m*电压暂降的频次为

$$\tilde{N}_{j1}^m = \sum_{i=1}^s \delta_i \tilde{l}_i \quad (15)$$

式中 δ_i 、 \tilde{l}_i 分别表示第*i*条线路故障率和第*i*条线路落在凹陷域内长度区间数;*s*为线路总数。又由 $\tilde{V}_{n \times 2m}$ 知,同一电压曲线每天峰谷时段和不同电压曲线都对应着不同的凹陷域区间和频次区间,于是把

$\tilde{V}_{n \times 2m}$ 作为输入变量可以建立母线*m*频次区间矩阵:

$$\tilde{N}_{n \times 2}^m = \begin{bmatrix} \tilde{V}_{11}^m \tilde{N}_{12}^m \\ \dots \\ \tilde{N}_{j1}^m \tilde{V}_{j2}^m \\ \dots \\ \tilde{V}_{n1}^m \tilde{V}_{n2}^m \end{bmatrix}$$

其中, \tilde{V}_{j1}^m 、 \tilde{V}_{j2}^m 分别表示全年正常运行电压都为 \tilde{V}_{j1} 或 \tilde{V}_{j2} 时母线*m*电压暂降频次区间数。

由时间权重点值矩阵知,频次区间矩阵各元素仅仅是表征了系统某一段时间的运行状态。母线*m*全年暂降频次是各种运行状态的综合体现,由此全年电压暂降频次为

$$\tilde{V}^m = \sum_{j=1}^n (\tilde{V}_{j1}^m w_{j1} + \tilde{V}_{j2}^m w_{j2}) w_{j3} \quad (16)$$

4.3 评估流程

考虑故障前电压峰谷、时变、区间特性的电压暂降频次评估一般过程如下。

(1) 根据电力部门提前制定的电压曲线,计算形成故障前电压幅值区间矩阵 $\tilde{V}_{n \times 2m}$ 和时间权重矩阵 $w_{n \times 3}$ 。

(2) 根据系统设置故障点,故障率计算考察母线电压暂降频次区间矩阵 $\tilde{N}_{n \times 2}^m$ 。

(3) 由公式(16)计算考察母线全年电压暂降频次变化区间。

评估流程见图4。

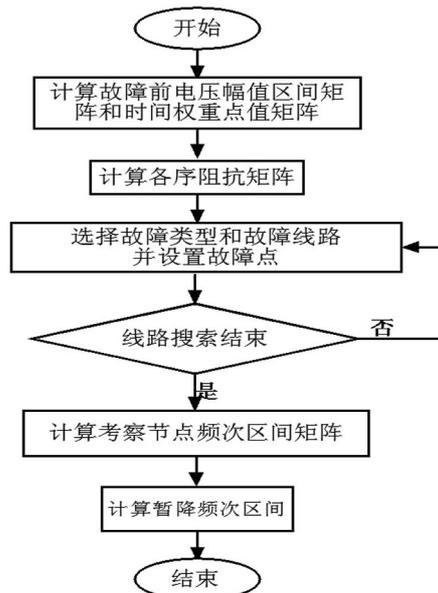


图4 电压暂降频次评估流程

5 算例仿真

以某区级实际电网为例,用该文评估算法对该电网进行仿真分析。电网如图 5 所示,包括 38 条母线,17 条线路,17 台变压器,不考虑变压器接线方式。在评估该电网时,以产生最严重不对称电压暂降的单相接地短路为例进行说明。

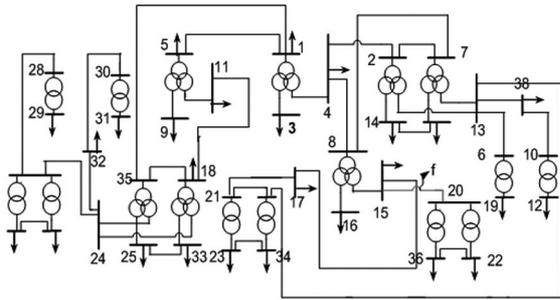


图 5 电网结构图

仿真以该电网丰水期电压运行曲线作为输入参数,假定图 5 线路 15-20 故障点 $f(0.5 \text{ p.u.})$ 处发生单相短路故障,分别计算故障前电压为 1 p.u. 和为丰水期幅值区间矩阵时母线 9、13、16、18 故障后的电压幅值,结果如表 1 所示。

表 1 故障后电压幅值

母线 编号	故障前 电压 /p.u.	丰水期曲线	
		峰期	谷期
9	0.428 9	[0.337 7 0.440 8]	[0.345 7 0.481 0]
13	0.314 2	[0.255 4 0.357 6]	[0.260 1 0.338 0]
16	0.206 6	[0.163 4 0.234 1]	[0.181 7 0.247 3]
18	0.455 9	[0.413 8 0.504 7]	[0.395 9 0.487 6]

表 1 计算结果表明,与粗略假设故障前电压为 1 p.u. 相比,通过建立故障前电压丰水期电压曲线幅值区间矩阵计算结果是在前者周围区间变化。

为了说明故障后电压暂降幅值区间结果的正确性和客观性,用实际电压截面计算结果来比较。实际电压截面计算通过 SCADA 系统实际采集的各母

表 2 实际电压截面计算结果

母线 编号	7 月 14 日		7 月 15 日		7 月 16 日	
	峰期	谷期	峰期	谷期	峰期	谷期
9	[0.346 1 0.444 2]	[0.348 2 0.452 5]	[0.340 3 0.404 5]	[0.335 7 0.424 9]	[0.348 1 0.431 2]	[0.356 7 0.455 4]
13	[0.257 4 0.335 5]	[0.263 5 0.297 0]	[0.254 3 0.348 4]	[0.269 2 0.313 3]	[0.282 0 0.357 0]	[0.288 3 0.328 3]
16	[0.183 1 0.216 3]	[0.184 0 0.233 8]	[0.169 7 0.222 8]	[0.187 0 0.235 0]	[0.209 7 0.231 2]	[0.193 0 0.225 5]
18	[0.435 0 0.488 1]	[0.413 7 0.484 2]	[0.424 7 0.481 4]	[0.430 4 0.486 4]	[0.438 1 0.491 0]	[0.438 8 0.473 5]

线电压,取多个时间点全网电压截面为故障前电压。最终,计算出指定故障点发生故障时,研究母线电压暂降幅值的波动范围。

以该区域电网丰水期中 3 天为例,每 1 min 全网电压截面作为故障前电压,通过每天 1 440 次点值计算,故障后电压的实际波动范围。由表 2 的计算结果可知,母线 9、13、16、18 每天峰谷时段故障后电压区间边界均在表 1 计算区间之内。由于每天负荷变化规律不一样,造成每天实际计算峰谷时段电压幅值区间相对计算结果要保守,但是 3 天各条母线峰谷时段最大区间边界均与计算结果相差无几。由此证明了算法基于故障前电压的时变区间模型的故障后电压幅值区间计算的完备性。

当研究母线故障后电压幅值在一定区间范围内变化时,它每年遭受的电压暂降频次也在一个区间范围内变化。以 2009 年 7 月份为例进行评估,当月运行有两套电压曲线(丰水期电压曲线和节假日电压曲线),假定耐受电压幅值为 0.4 p.u.,限于篇幅这里就不给出故障前电压的幅值区间矩阵,仅仅给出时间权重矩阵: $\begin{bmatrix} 0.542 & 0.458 & 0.71 \\ 0.625 & 0.375 & 0.29 \end{bmatrix}$; 在系统中模拟 1 000 个故障点,分别计算故障前电压为 1 p.u.,每 10 min 一个截面的实际电压和幅值区间矩阵的情况,频次计算结果如表 3。

10 min 一个截面通过 4 464 次实际电压截面计算得到暂降频次区间,反应了研究母线暂降频次随系统暂降前母线电压区间波动是以区间波动的客观实际。且算法通过一次区间计算得到区间边界与经过大量实际电压截面计算得到的区间边界相差无几,证明了该方法的正确性和高效性。相对于粗略假定故障前电压为 1 p.u.,由于该算法考虑故障前电压的变化区间,因而可以方便地计及故障前电压变化对系统暂降频次的影响。算法所得的结果包含的信息量大,采用评估结果进行决策,更加符合工程实际。

表3 7月电压暂降频次

母线 编号	故障前 电压为1	10 min 一个截面	采用 方法
9	0.196 4	[0.195 9 0.283 2]	[0.189 2 0.290 7]
13	0.237 5	[0.218 7 0.286 5]	[0.208 0 0.295 2]
16	0.282 5	[0.255 7 0.294 4]	[0.250 2 0.305 5]
18	0.195 0	[0.193 8 0.216 6]	[0.189 3 0.218 5]

6 结 论

(1) 考虑了故障前电压实际特点,建立了故障前电压的数学模型——幅值区间矩阵和时间权重重点值矩阵,反应了故障前电压峰谷、时变、区间三大特性,更加符合工程实际。

(2) 基于故障前电压的幅值区间矩阵和时间权重重点值矩阵,提出了用区间分析的方法评估母线电压暂降频次,并给出了评估的一般流程。

(3) 对某区级实际电网仿真并与故障前电压为1 p.u.和实际电压截面评估结果比较证明,评估算法仅需一次区间评估就能得到随故障前电压实际波动暂降频次的区间范围,具有快速、准确、客观的特点。采用所提出方法对电压暂降进行评估,评估结果更符合工程实际,为决策者提供了更加充分的决策信息。

参考文献

[1] 刘颖英,徐永海,肖湘宁.地区电网电能质量综合评估新方法[J].中国电机工程学报,2008,28(22):130-136.

[2] 周林,吴红春,孟婧,等.电压暂降分析方法研究[J].高电压技术,2008,34(5):1010-1016.

[3] 陶顺,肖湘宁,刘晓娟.电压暂降对配电系统可靠性影响及其评估指标的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(11):63-69.

[4] Xianyong Xiao,Fangwei Xu,Honggeng Yang.Short Duration Disturbance Classifying Based on S-transform Maximum Similarity[J].International Journal of Electrical Power& Energy Systems,2009,30(7):374-378.

[5] 沈广,陈允平,李欣.基于电能质量实时监测系统的电压暂降研究[J].高电压技术,2006,32(5):97-99.

[6] 李妍,段余平,邱军,等.电压暂降的计算及故障点电压暂降系数确定[J].高电压技术,2006,32(7):113-124.

[7] Martinez J A,Martin-Arnedo J.Voltage Sag Stochastic Prediction Using an Electromagnetic Transients Program[J].IEEE Trans on Power Delivery,2004,19(4):1975-1982.

[8] M.H.J.Bollen.Method of Critical Distances for Stochastic Assessment of Voltage Sags[J].IEE Proceedings Genera-

tion,Transmission & Distribution,1998,145(1):70-76.

[9] Gupta C P,Milanovic J V.Probabilistic Assessment of Equipment Trips Due to Voltage Sags[J].IEEE Trans on Power Delivery,2006,21(2):711-718.

[10] Bollen M H J.Fast Assessment Method for Voltage Sags in Distribution Systems[J].IEEE Trans on Industry Applications,1996,32(6):1414-23.

[11] Qader M R,Bollen M H J,Allan R N.Stochastic Prediction of Voltage Sags in a Large Transmission System[J].IEEE Trans on Industry Applications,1999,35(1):152-162.

[12] Elisa E J,Araceli H.An Analytical Approach for Stochastic Assessment of Balanced and Unbalanced Voltage Sags in Large Systems[J].IEEE Trans on Power Delivery,2006,21(3):1493-1500.

[13] Chang Hyun park,Gilsoo Jang.Stochastic Estimation of Voltage Sags in Large Meshed Network[J].IEEE Trans on Power Delivery,2007,22(3):1655-1664.

[14] 肖先勇,李皖,马超,等.受系统不确定因素影响的电压暂降频次评估[J].高电压技术,2009,35(7):1600-1606.

[15] Chang-Hyun Park,Gilsoo Jang,Robert J.Toms.The Influence of Generator Scheduling and Time-varying Fault Rates on Voltage Sag Prediction[J].IEEE Trans on Power Delivery,2008,23(2):1243-1250.

[16] Milanovic J V,Aung M T,Gupta C P.The Influence of Fault Distribution on Stochastic Prediction of Voltage Sags[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(1):278-285.

[17] 肖先勇,马超,李勇.线路故障引起电压凹陷的频次最大熵评估[J].中国电机工程学报,2009,29(5):87-93.

[18] 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评估[J].电力自动化设备,2009,29(9):7-10.

[19] 王守相,王成山,刘若沁.基于模糊区间算法的配电网潮流计算[J].电力系统自动化,2000,25(2):19-23.

[20] 王成山,王守相.基于区间算法的配电网三相潮流计算及算例分析[J].中国电机工程学报,2002,22(3):58-62.

[21] 刘天琪,邱晓燕.电力系统分析理论[M].北京:科学出版社,2005:161-162.

作者简介:

张忠(1976)男,现在四川省电力公司超(特)高压运行检修公司,长期从事电力生产工作;

徐培栋(1986)男,现在江苏省电力公司检修分公司无锡分部,长期从事电力生产工作。

(收稿日期:2012-05-22)