

电压骤降和瞬时供电中断概率评估的蒙特卡罗仿真

宋云亭¹, 郭永基¹, 张瑞华²

(1. 清华大学电机系, 北京市 100084; 2. 中国科学院电工研究所, 北京市 100080)

摘要:对动态电能质量中最主要的两个问题——电压骤降和瞬时供电中断进行了研究,提出了基于非序贯蒙特卡罗模拟和电磁暂态仿真相结合的电能质量概率评估新方法和相应的概率评估指标体系。算法利用蒙特卡罗仿真得到各种故障信息,并考虑保护设备的参数及各种故障类型,通过仿真程序 PSCAD/EMTDC 对蒙特卡罗模拟法随机产生的各种故障形态进行仿真计算,最后分析统计得到系统和敏感负荷点电能质量的各项概率指标。文中以 RBTS 标准测试系统为例进行了计算分析,算例表明了模型和算法的有效性。计算结果对规划调度有重要的参考价值。

关键词:供电可靠性;电能质量;概率评估;蒙特卡罗模拟;电磁暂态仿真

中图分类号: TM711

0 引言

电能质量问题除了电流波形畸变、稳态电压质量和电能的可靠性等问题之外,还包括未为人们所熟知和重视的动态电能质量问题,其造成的经济损失非常巨大^[1],因而日益受到人们的关注。

动态电能质量问题包括电压骤降(voltage sag)、瞬时供电中断(momentary interruption)、电压脉冲和浪涌等。其中电压骤降和瞬时供电中断被认为是影响许多用电设备正常、安全运行的最严重的问题,因此评估其特性对用户和电力公司来说都十分必要。

电压骤降在 IEEE 标准中被定义为:供电系统中某点的工频电压有效值突然下降至额定值的 10%~90%,并在随后的 10 ms~1 min 的短暂持续期后恢复正常。

瞬时供电中断在 IEEE 标准中被定义为:供电系统中一相或多相电压完全失去(小于 0.1 标幺值),持续时间在 10 ms~3 s 之间的一种短时电压变化。

目前国外对电能质量问题进行了较为深入的研究^[2,3],而国内的研究刚刚开始^[1,4,5]。由 Bollen 提出并在 IEEE 标准中被推荐使用的“临界距离法”^[3]是一种解析法,比较适合手工计算,但考虑的故障模式简单,一般仅适于三相短路分析,由于电力系统故障的地点和类型具有很强的随机性,因而本文借鉴模拟法在发输电组合系统可靠性评估中的应用成

果^[6],提出了基于蒙特卡罗模拟的概率评估新方法,利用电力系统元件的可靠性数据,通过蒙特卡罗仿真得到各种故障信息,并考虑各种故障类型及保护设备的参数等复杂情况,同时通过电磁暂态仿真对各种故障形态进行详细的模拟,得到故障情况下的电压骤降和瞬时供电中断的幅值、频率、持续时间等特征,最后分析统计得到系统和敏感负荷点的一系列概率指标,从而将蒙特卡罗模拟与电磁暂态仿真计算结合起来。通过对 RBTS 标准测试系统的计算分析,验证了模型和算法的有效性,评估结果可用于预测系统性能、评估电压骤降引起的损失及测试各种解决电能质量问题的设备和技术对系统性能的改善效果。

1 电能质量概率评估算法模型

1.1 基于蒙特卡罗模拟的电能质量评估方法

由于电力系统在本质上是一个随机系统,因此通过概率模拟方法对电力系统进行概率建模及统计评价,能从整体和宏观上评价电力系统的性能。蒙特卡罗方法就是一种概率模拟方法,其基本思想是:为了求解一个问题,首先建立一个概率模型或随机过程,使它的参数等于问题的解,然后通过对模型或过程的观察或抽样实验来计算所求参数的统计特征,最后给出所求问题的解的近似值,并给出解的精度或误差。蒙特卡罗仿真法的优点在于能反映电力系统的随机特性,使用该方法几乎不受系统复杂性的限制。

电能质量评估方法有两类:基于数字模拟的预测方法和基于实测数据的方法。由于实测方法存在所得指标在概率意义上的置信度不高的明显缺陷,

收稿日期:2003-01-04。

教育部博士学科点专项科研基金资助项目(1999000347)。

因而数字模拟是十分有效的替代方法,通过详细模拟能得到与实测方法等效的电压随时间变化的规律。时域仿真程序 PSCAD/EMTDC 是目前世界上广泛使用的一种电力系统分析软件^[7]。

本文通过对蒙特卡罗模拟产生的样本进行仿真分析得到敏感负荷点的电压骤降和瞬时供电中断频率分布表,并将其与通过实测得到的 CBEMA 相结合即可定量评估因电压跌落和瞬时供电中断引起设备停运而造成的经济后果。按照上述思路,电能质量概率评估算法的总流程如图 1 所示。



图 1 电能质量概率评估的算法流程
Fig. 1 Flow chart of probabilistic assessment to power quality

1.2 电能质量评估数据需求

计算所需数据包括电力系统结构参数、运行参数和统计数据,算法中通过对随机抽样值与统计数据的比较获得故障信息。统计数据主要包括线路故障概率、线路各种故障类型所占比例等:

$$P(L_i) = \frac{\lambda_i L_i}{\mu_i + \lambda_i L_i} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$P(n_i) = \frac{n_i}{\sum n_i} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

式中: $P(L_i)$ 为线路 i 发生故障的概率; λ_i 为线路 i 的故障率; L_i 为线路 i 的长度; μ_i 为线路 i 的修复率; N 为线路条数; $P(n_i)$ 为发生第 i 类故障的概率; n_i 为统计时间内发生第 i 类故障的次数; k 为所考虑的故障类型数。

算法中 k 取值为 4, 即考虑 4 种类型的故障, 并进一步细化为如下 10 种情况: ① A 相接地短路; ② B 相接地短路; ③ C 相接地短路; ④ AB 两相短路接地; ⑤ AC 两相短路接地; ⑥ BC 两相短路接地; ⑦ 三相短路; ⑧ AB 相间短路; ⑨ AC 相间短路; ⑩ BC 相间短路。

1.3 故障信息的确定

故障形态的各种信息(包括故障线路、故障类型、故障位置)通过蒙特卡罗模拟法随机产生。

1.3.1 故障线路的确定

算法采用随机方法产生每次抽样的线路, 即每条线路被抽到的次数与其故障概率成正比。判断线路是否故障可应用下式:

$$\begin{cases} x \leq P(L_i) & \text{则线路 } i \text{ 故障} \\ x > P(L_i) & \text{则线路 } i \text{ 正常} \end{cases} \quad (3)$$

式中: x 为均匀分布的随机变量。

1.3.2 故障类型确定

将区间 $[0, 1]$ 按故障类型数 k 分为 k 个区间, 各区间长度 m_i 满足:

$$m_i = P(n_i) \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^k m_i = \sum_{i=1}^k P(n_i) = 1$$

显然,

$$\begin{cases} P_j^* = 0 \\ P_j^* = \sum_{i=1}^j P_i \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (5)$$

抽取 $y \sim \mu(0, 1)$, 则当 $P_{j-1}^* < y \leq P_j^*$ 时, 判定线路发生第 j 类故障。

1.3.3 故障位置的确定

故障位置用故障点到线路首端距离的标么值 λ_g 表示, 即对于故障线路 L_g , 若 K 为故障点位置, 如图 2 所示, 则 $L_K = \lambda_g L_g$ 。

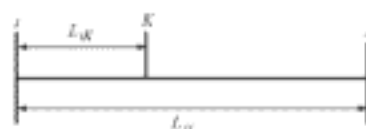


图 2 线路故障位置的确定
Fig. 2 Fault location of line

2 电能质量概率评估指标

电能质量不完全取决于电力企业, 有的质量指标由用户的干扰决定, 有的是由事故和外力引起; 在不同的供用电时刻, 电能质量指标是不同的, 电能质量在空间和时间上均处于动态变化中。这说明电能质量指标宜用概率统计结果来衡量。对各负荷点和整个系统给出定量的电能质量概率指标, 不仅能发现电网中存在的薄弱点, 而且也是否为采取适当的改善电能质量的措施提供了依据。

目前提出的概率指标包括敏感负荷点指标和系统指标。敏感负荷点指标定义如下:

a. 电压骤降概率 $P_{VS,i}$:

$$P_{VS,i} = N_{VS,i} / N \quad (6)$$

- b. 瞬时供电中断概率
- $P_{MI,i}$

$$P_{MI,i} = N_{MI,i} / N \quad (7)$$

- c. 电压可用率
- $A_{V,i}$
- :

$$A_{V,i} = (1 - P_{VS,i} - P_{MI,i}) \times 100\% \quad (8)$$

- d. 年电压骤降频率
- $F_{VS,i}$
- :

$$F_{VS,i} = \sum_{j=1}^{N_{VS,i}} \frac{\lambda_{k,j}}{N} N_L \quad (9)$$

- e. 停供电力期望值
- $P_{DNS,i}$
- :

$$P_{DNS,i} = (P_{VS,i} + P_{MI,i}) P_{Di} \quad (10)$$

- f. 年停供电量期望值
- $E_{ENS,i}$
- :

$$E_{ENS,i} = 8\,760 P_{DNS,i} f_i \quad (11)$$

- g. 年电压骤降损失
- $L_{VS,i}$
- :

$$L_{VS,i} = F_{VS,i} C_i \quad (12)$$

式中: $N_{VS,i}$ 为负荷点 i 的电压骤降次数; N 为模拟抽样的总次数; $N_{MI,i}$ 为负荷点 i 的瞬时电压中断次数; $\lambda_{k,j}$ 为引起第 j 次电压骤降的第 k 条线路的故障率(单位为次/年); N_L 为线路的总条数; P_{Di} 为负荷点 i 的负荷需求(单位为 MW); f_i 为负荷率; C_i 为负荷点 i 由于一次电压骤降造成的停运损失(单位为元/年)。

在负荷点指标的基础上, 我们可进一步定义相应的系统指标。系统指标可由以下各式求得:

- a. 系统电压骤降平均概率
- P_{VS}
- :

$$P_{VS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{VS,i} \quad (13)$$

- b. 系统瞬时供电中断平均概率
- P_{MI}
- :

$$P_{MI} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{MI,i} \quad (14)$$

- c. 系统电压平均可用率
- A_V
- :

$$A_V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{V,i} \quad (15)$$

- d. 系统电压骤降频率
- F_{VS}
- :

$$F_{VS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{VS,i} \quad (16)$$

- e. 停供电力期望值
- P_{DNS}
- :

$$P_{DNS} = \sum_{i=1}^n P_{DNS,i} \quad (17)$$

- f. 年停供电量期望值
- E_{ENS}
- :

$$E_{ENS} = \sum_{i=1}^n E_{ENS,i} \quad (18)$$

- g. 年电压骤降损失
- L_{VS}
- :

$$L_{VS} = \sum_{i=1}^n L_{VS,i} \quad (19)$$

式中: n 为系统接有敏感负荷的节点总数。

3 算例

上述算法模型适用于各种不同规模的系统, 应

用于大系统时, 具有较大的计算复杂性。为简化计算, 说明问题, 算例系统采用 IEEE-RTS 测试系统^[8]。

3.1 原始数据

算例系统线路参数见表 1。短路故障类型及所占比例为: 单相接地 81%, 两相短路 6%, 两相短路接地 9%, 三相短路 4%。假定所有负荷节点均接有敏感负荷, 各项参数如表 2 所示。

表 1 输电线路参数
Table 1 Information of transmission lines

线路	起点	终点	长度/ km	故障 率	线路	起点	终点	长度/ km	故障 率
L1	1	3	75	1.5	L6	1	3	75	1.5
L2	2	4	250	5.0	L7	2	4	250	5.0
L3	1	2	200	4.0	L8	4	5	50	1.0
L4	3	4	50	1.0	L9	5	6	50	1.0
L5	3	5	50	1.0					

表 2 敏感负荷点的各项参数
Table 2 Parameters of sensitive load bus

节点	P_D / MW	f	停运损失/ (元·年 ⁻¹)	电压骤降 幅值	持续时间/ ms
2	20	0.80	1 200	0.6	200
3	85	0.80	1 200	0.6	200
4	40	0.80	2 000	0.7	150
5	20	0.80	2 500	0.5	200
6	20	0.80	2 500	0.5	300

系统远端的短路故障是引起电压骤降和瞬时供电中断的主要原因。目前输配电系统中的线路主保护是电流保护, 该保护最大的缺陷是线路中相当大部分区域上的故障不能无延时地予以切除, 因此在故障期间, 故障线路及其附近线路上的敏感负荷将会因电压跌落和瞬时供电中断而被跳闸退出工作。

电压骤降持续时间与继电保护整定时间有关, 仿真中考虑两种典型的主保护方式, 对于辐射型线路采用过电流保护(清除时间整定为 300 ms); 对于环形线路采用距离保护(其中第 1 段保护线路的 90%, 第 2 段保护余下的部分, 清除时间分别整定为 150 ms, 550 ms)。

3.2 电压骤降和瞬时供电中断的模拟

模拟中输电线路采用考虑分布参数的贝瑞龙模型。通过 EMTDC 仿真计算得到的典型电压骤降曲线如图 3 所示。

幅值和持续时间分别按如下规则确定: ①电压骤降幅值为模拟得到的电压有效值随时间变化曲线上的最低点, 其变化范围为额定值的 10%~90%, 若电压幅值小于 10%, 则发生瞬时供电中断。②电压骤降持续时间为电压骤降事件中在电压有效值随

时间变化曲线上电压幅值小于 90% 额定值的总时间。

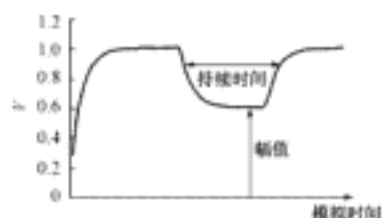


图 3 仿真得到的电压骤降曲线
Fig. 3 Voltage sag curves by simulation

仿真得到的曲线与文献[9]中给出的实测曲线形状一致,可见仿真是准确的。

3.3 计算结果和分析

经过 50 000 次仿真计算后统计分析得到的各节点不同幅值(标么值)的电压骤降和瞬时供电中断概率见表 3 和图 4。

表 3 各节点电压骤降幅值和瞬时供电中断概率分布
Table 3 Probability distribution of voltage sag magnitude and momentary interruption for nodes

幅值	概率				
	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5	节点 6
0.8~0.9	0.005 96	0.008 14	0.008 70	0.008 02	0.006 66
0.7~0.8	0.004 32	0.006 46	0.006 02	0.009 14	0.010 32
0.6~0.7	0.001 20	0.001 22	0.001 36	0.001 84	0.003 02
0.5~0.6	0.001 08	0.001 30	0.001 28	0.000 26	0.000 80
0.4~0.5	0.000 50	0.000 04	0.000 04	0.000 10	0.000 24
0.3~0.4	0.000 16	0.000 02	0.000 22	0.000 36	0.000 18
0.2~0.3	0.000 20	0.000 32	0.000 12	0.000 08	0.000 10
0.1~0.2	0.000 24	0.000 26	0.000 18	0.000 06	0.000 08
电压中断	0.000 10	0.000 18	0.000 12	0.000 14	0.000 16

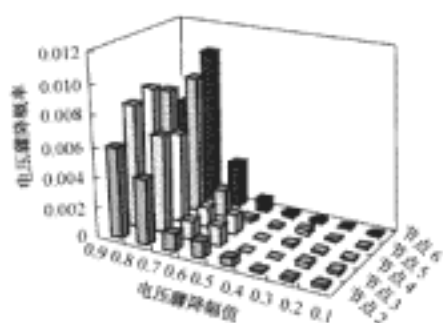


图 4 各节点电压骤降幅值概率分布
Fig. 4 Probability distribution of voltage sag magnitude for nodes

从图 4 和表 3 中可见,低幅(0.7~0.9)的电压骤降概率要远远大于大幅度(<0.7)的电压骤降概率。图 4 中电压骤降幅值分布与文献[3,9]中实测得到的分布图接近,分布趋势都是绝大多数的电压骤降幅值均在 0.6 以上,可见仿真结果准确。

进一步可得到各节点的年电压骤降和电压中断

频率,以节点 4 为例,表 4 给出其累积频率指标。

表 4 节点 4 的电压骤降和电压中断累积频率
Table 4 Cumulative frequency of voltage sag and momentary interruption for node 4

电压骤降幅值	累积频率/(次·年 ⁻¹)			
	<150 ms	150 ms~300 ms	300 ms~450 ms	>450 ms
<0.9	20.8	14.6	9.4	5.1
<0.8	13.9	11.3	7.5	4.2
<0.7	9.3	8.1	6.5	3.8
<0.6	7.6	5.4	4.7	3.5
<0.5	5.4	4.1	3.5	2.2
<0.4	4.1	3.7	3.1	1.7
<0.3	3.2	2.3	1.9	1.3
<0.2	1.5	1.1	0.7	0.5
电压中断	0.9	0.6	0.4	0.2

注: * 为持续时间,其余同。

根据表 4 的结果,可进一步画出节点 4 的年电压骤降和电压中断频率分布趋势图,如图 5 所示。

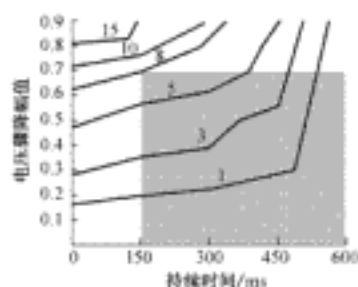


图 5 节点 4 的年电压骤降和电压中断频率趋势
Fig. 5 Cumulative frequency curves of voltage sag and momentary interruption for node 4

由图 5 中可看出,从左上角到右下角,随着幅值的减小和持续时间的增加,节点 4 的年电压骤降频率逐步递减,将此图与该节点所接敏感设备的 CBEMA 曲线相结合,即可得到该设备的年电压骤降次数。节点 4 所接设备的电压骤降幅值为 0.7,持续时间为 150 ms,图 5 中阴影部分为设备的停运区域,由图中可看出,该设备因电压骤降引起的停运频率为 8.1 次/年。

根据表 3 和表 4 中的结果按前述公式可计算得到各敏感负荷节点的概率指标值如表 5 所示。

表 5 各节点的电能质量概率指标
Table 5 Voltage sag probabilistic indices for nodes

节点	$P_{VS,4}$	$P_{MI,4}$	$A_{VS,4}$	$F_{VS,4}$	$P_{DAS,4}$	$E_{EDS,4}$	$L_{VS,4}$
2	0.013 7	0.000 05	98.634	5.1	0.273 2	2 034	6 120
3	0.017 8	0.000 02	98.224	5.1	1.509 6	11 240	6 120
4	0.018 0	0.000 08	98.208	8.1	0.716 8	5 337	16 200
5	0.019 9	0.000 10	98.014	3.9	0.397 2	2 958	9 750
6	0.021 4	0.000 14	97.890	3.5	0.428 0	318 7	8 750

从表5中可看出,节点2和3的电压骤降频率比节点5和6要高,但是由于节点5和6每次电压骤降损失比节点2和3要大得多,因而节点5和6总的损失更大。由结果可看出,指标体系完备,算法可对电压骤降和瞬时供电中断进行全面分析,所得可靠性和经济性指标可定量评估电力系统的电压骤降和瞬时供电中断特性。

4 结论

a. 采用蒙特卡罗模拟法能同时考虑各种短路类型和保护设备的参数等复杂情况,从而获得了可信的电压骤降和瞬时供电中断的概率指标。

b. 通过 EMTDC 仿真程序对各种元件的细致模拟能准确地反映系统的电压骤降和瞬时供电中断特性,并且所提出的系统和负荷点的指标全面地反映了系统的特性。

c. 算法提供的定量分析结果对于电力部门和用户在规划、运行阶段进行成本/效益的定量投资分析、方案比较以及采取减轻电能质量危害的措施是十分必要的科学依据。

参考文献

- 1 韩英铎,严子贵,姜齐荣,等(Han Yingduo, Yan Ziguai, Jiang Qirong, et al). 信息电力与 FACTS 及 DFACTS 技术(Electric Power in Information Society and FACTS & DFACTS). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(19):1~7
- 2 Arrillaga J, Watson N R, Chen S. Power System Quality

- Assessment. New York: Wiley, 2000
- 3 Bollen M H J. Understanding Power Quality Problems—Voltage Sags and Interruptions. New York: IEEE Press, 2000
- 4 张鹏,郭永基(Zhang Peng, Guo Yongji). 电压骤降的可靠性评估新方法(Probabilistic Assessment of Voltage Sags in Power Systems). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(8):20~24
- 5 胡铭,陈珩(Hu Ming, Chen Heng). 电能质量及其分析方法综述(Survey of Power Quality and Its Analysis Methods). 电网技术(Power System Technology), 2000, 24(2):36~38
- 6 Billinton R, Li Wenyuan. Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte-Carlo Methods. New York and London: Plenum Press, 1994
- 7 林良真,叶林(Lin Liangzhen, Ye Lin). 电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC(An Introduction to PSCAD/EMTDC). 电网技术(Power System Technology), 2000, 24(1):65~66
- 8 Billinton R, Kumar S, Chowdhury N, et al. A Reliability Test System for Educational Purposes—basic Data. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(3):1238~1244
- 9 Lamoree J, Mueller D, Vinetti P, et al. Voltage Sag Analysis Case Studies. IEEE Trans on Industry Applications, 1994, 30(4):1083~1089

宋云亭(1972—),男,博士研究生,主要从事电力系统可靠性和人工智能在电力系统中的应用研究。E-mail: syt00@mails.tsinghua.edu.cn

郭永基(1934—),男,教授,博士生导师,IEEE 高级会员,长期从事电力系统可靠性方面的科研和教学工作。

张瑞华(1975—),女,博士研究生,主要从事电力系统电能质量、磁悬浮列车供电系统的研究。

PROBABILISTIC ASSESSMENT OF VOLTAGE SAGS AND MOMENTARY INTERRUPTION BASED ON MONTE-CARLO SIMULATION

Song Yunting¹, Guo Yongji¹, Zhang Ruihua²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Voltage sags and momentary interruptions are among the most serious dynamic power quality problems. This paper proposes a new probabilistic assessment algorithm of power quality based on non-sequential Monte-Carlo simulation and electro-magnetic transient simulation. The authors establish a systematic set of indices for probabilistic assessment of power quality, including the customer-orientated and global system-orientated indices. The advantage of Monte-Carlo simulation approach is that it can reflect the stochastic nature of power system behaviors. The application of the proposed method almost poses no restrictions on the system complexity. The Monte-Carlo simulation generates all kinds of fault information by using reliability data of the components in power system. In the process of electro-magnetic transient simulation by the program of PSCAD/EMTDC, all fault types and different protection schemes are considered. Finally the power quality indices of system and sensitive load nodes are obtained. The algorithm is proved to be effective and applicable by the numerical results of the IEEE-RBTS test system.

This work is supported by PhD Program Research Foundation of the State Education Ministry (No. 1999000347).

Key words: power supply reliability; power quality; probabilistic assessment; Monte-Carlo simulation; electro-magnetic transient simulation