

计及失效事件和严重程度不确定性的 设备电压暂降失效率评估

杨 达¹,肖先勇²,汪 颖¹

(1. 四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065;2. 四川大学 智能电网四川省重点实验室,四川 成都 610065)

摘要: 综合考虑电压暂降影响下设备失效事件发生和后果严重程度复杂不确定性的设备失效样本,将设备失效样本分为由随机性、模糊性和交叉不确定性引起的失效样本,分别用随机熵、模糊熵和交叉熵度量刻画相应的不确定性,建立最大混合熵评估模型,并用近似规划法求解。在分别定量评估 3 类不确定性引起的设备失效率的基础上,按各自的权重进行设备失效率综合评估,评估结果表明,该方法能克服现有方法的过估计和欠估计问题。

关键词: 设备;失效率;电压暂降;随机性;模糊性;交叉不确定性;最大混合熵模型

中图分类号: TM 714.2

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.10.019

0 引言

电压暂降被认为是导致现代电力负荷巨大经济和产品损失的最严重的电能质量问题^[1-7]。评估设备因电压暂降引起的失效率已成为当前国内外研究的热点^[7-12],尤其是在大量可再生能源并网和大量敏感设备接入系统后,准确、定量评估敏感设备的电压暂降失效率具有重要意义^[8-9]。

现有设备暂降失效率评估方法主要有实测统计法^[7,13-15]、概率法^[16-17]、模糊法^[18-19]以及改进的方法。实测统计法原理简单,数据可靠,但监测时间长且安装成本高,无预测性;概率法用概率函数刻画设备电压耐受曲线 VTC(Voltage Tolerance Curve)^[16-17]的不确定性,根据设备的不同敏感程度确定随机模型^[17],文献[20]用最大熵原理确定 VTC 的随机不确定性;模糊法考虑了设备从正常到故障的中间状态,认为设备电压暂降耐受曲线具有模糊性。显然,随机性、模糊性分别描述的是由因果律和排他律缺失引起的不确定性,概率法和模糊法仅考虑了设备 VTC 不确定性的一个方面,实际中,随机性和模糊性经常同时存在,因此需同时考虑这两方面的不确定性。

熵作为度量不确定性的重要特征量之一,最大熵原理可用于分析随机变量和模糊变量的最大可能分布^[20],可分别用概率熵、模糊熵进行刻画。考虑到实际中 VTC 同时具有随机性和模糊性的特点,可用同时包含概率熵和模糊熵的混合熵度量设备电压暂

降失效事件的复杂不确定性。混合熵理论在空间数据^[21]、产品测量^[22]、遥感图像^[23]等领域已得到应用,关键在于如何根据样本建立混合熵模型并求解。本文从实测样本出发,根据设备失效事件的具体物理特点,按照事件发生、发展和严重程度的不确定属性,对设备失效事件进行分类,将失效事件分为随机性、模糊性和交叉不确定性 3 类,然后根据样本统计所得各类事件的权重进行设备失效率的综合评估,并与现有随机法、模糊法进行对比,证明本文方法的合理性和准确性。

1 设备失效事件样本分类

实际测试表明,可编程逻辑控制器 PLC(Programmable Logic Controllers)、个人计算机和可调速电机 ASD(Adjustable Speed Drives)的 VTC 一般呈现矩形,在暂降幅值-时间平面上有一个不确定区域^[11],如图 1 中曲线 1 和曲线 2 之间区域。将该不确定区域划分为 A、B、C 3 个子区域,当暂降发生在区域 A 时,设备故障与否同时取决于暂降持续时间和暂降幅值;发生在区域 B 时,其取决于暂降持续时间,与暂降幅值无关;发生在区域 C 时,其仅与暂降幅值有关。图中 t 、 U 分别为暂降持续时间和暂降幅值。

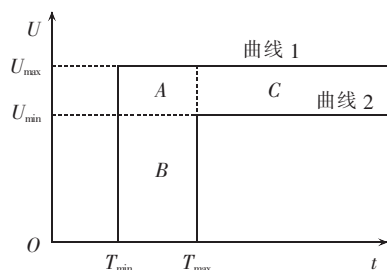


图 1 设备 VTC 分布的不确定区间

Fig.1 Uncertainty region of VTC of equipment

收稿日期:2012-05-01;修回日期:2013-07-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50877049);四川省应用基础研究项目(2008JY0043-2);四川省科技支撑计划资助项目(2010GZ0256)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50877049),Application Foundation of Sichuan Province(2008JY0043-2) and Scientific Supporting Subject by Sichuan Province(2010GZ0256)

VTC 不确定区域在物理本质上的不确定性有：发生在该区域的电压暂降是否导致设备失效的不确定；设备失效严重程度的不确定。因此，设备电压暂降失效事件的不确定性应从失效事件发生和失效严重程度两方面的不确定进行分析。

以 PC 机为例。实测发现，PC 机是否故障既与暂降特征有关，又与 PC 机当时的运行状态有关，失效事件发生的原因不明，因此设备是否失效的不确定性主要是随机性。发生电压暂降时，PC 机从正常到故障有一个过渡过程，该过程中，PC 机可能出现文档读写错误、计算出错、死机等不同状态，显然是度量失效严重程度的排他律缺失，属于模糊不确定性。实际中还发现，在电压暂降作用下，PC 机还可能出现“假死”状态，即发生短时故障后很快自动恢复正常，该类事件的失效严重程度难以精确度量，具有模糊性，而出现短时故障后能否自动恢复又具有随机性。可见，PC 机失效事件中同时包含了随机和模糊不确定性，具有混合不确定性。

根据设备失效事件发生的不确定性及其严重程度的不同，可将失效事件样本细分为 4 类：

- a. 仅失效事件发生与否不确定的随机性样本，其严重程度确定，如停机、死机等事件样本；
- b. 不仅事件发生与否随机，而且失效后是否自动恢复也随机，如自动重启；
- c. 事件发生与否随机，失效严重程度不确定，如文件丢失或计算错误；
- d. 是否发生失效随机，失效严重程度模糊，失效后能否自动恢复又随机，存在交叉不确定性，如 PC 机“假死”。

其中，a、b 类事件样本的不确定性均为随机性，c 类样本仅有模糊性，而 d 类样本的不确定性是随机性与模糊性的交叉不确定性。因此，根据实测样本的不确定性，可将样本分为图 2 所示的 3 类。

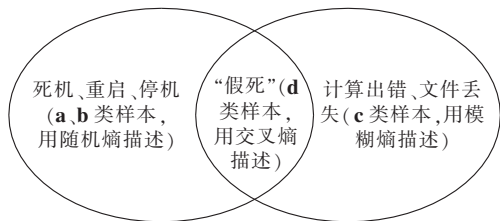


图 2 实测样本不确定性分类与熵的刻画

Fig.2 Sample uncertainty classification and entropy depiction

2 失效事件不确定性混合熵刻画

根据图 2 中样本不确定性分类，可引入混合熵概念刻画失效事件的不确定性。混合熵由随机熵、模糊熵、交叉熵组成，这样可对实际设备失效事件的混合不确定性进行更科学的刻画。

根据 Deluca 和 Termini 的定义，混合熵 H 为：

$$H = - \sum_{i=1}^n [p_i \mu_i \lg(p_i \mu_i)] - \sum_{i=1}^n \{p_i(1-\mu_i) \lg[p_i(1-\mu_i)]\} \quad (1)$$

其中， n 为不确定样本总数； p_i 为样本概率； μ_i 为样本的模糊隶属度。

当电压暂降发生在图 1 所示区域 B 时，失效事件仅与暂降持续时间 t 有关；当暂降发生在区域 C 时，失效事件仅与暂降幅值 U 有关；仅当暂降发生在区域 A 时才同时取决于 t 和 U 。假设 t 和 U 对设备失效事件的影响是独立的^[20]，可分别评估 t 、 U 的影响后进行综合。在式(1)中， U 、 t 导致的设备 VTC 出现的概率和模糊隶属度分别表示为 p_{U_i} 、 μ_{U_i} 和 p_{t_i} 、 μ_{t_i} ，对应的样本数分别表示为 n_{U_i} 、 n_{t_i} 。

式(1)引入的混合熵应满足的基本公理^[24]：当模糊性消失时，混合熵退化为随机熵；随机性消失时，混合熵退化为模糊熵。

对式(1)进行简单变化得：

$$H = - \sum_{i=1}^n (p_i \lg p_i) - \sum_{i=1}^n [\mu_i \lg \mu_i + (1-\mu_i) \lg(1-\mu_i)] + \sum_{i=1}^n \{(1-p_i) [\mu_i \lg \mu_i + (1-\mu_i) \lg(1-\mu_i)]\} = H_r + H_f - H_{rf} \quad (2)$$

其中， H_r 、 H_f 、 H_{rf} 分别为随机熵、模糊熵、交叉熵。

由式(2)可知，当 $\mu_i = 0$ 或 1 时，即模糊性消失时， $H = H_r$ ，此时混合熵退化为随机熵，同理，当 $p_i = 0$ 或 1 时，即随机性消失时， $H = H_f$ ，此时混合熵退化为模糊熵，因此，混合熵能更合理地刻画设备失效事件的混合不确定性。

3 最大混合熵评估模型与解法

3.1 最大混合熵评估模型

混合熵作为对复杂不确定性的度量，在有限的约束条件下，当熵值越大时，所得不确定性规律中包含的主观因素越少，因此，可根据最大混合熵模型确定电压暂降幅值、持续时间引起的在不确定区域 A 、 B 、 C 内设备耐受能力曲线出现的概率 p_i 和严重性隶属度 μ_i 。

最大混合熵模型为：

$$\max H = - \sum_{i=1}^n [p_i \mu_i \lg(p_i \mu_i)] - \sum_{i=1}^n \{p_i(1-\mu_i) \lg[p_i(1-\mu_i)]\} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & \sum_{i=1}^n p_i = 1 \\ & \mu_i = g(p_i) \\ & \sum_{i=1}^n i p_i = E_1 \\ & \sum_{i=1}^n (i - E_1)^h p_i = E_h \\ & 0 \leq p_i \leq 1 \end{aligned} \quad (4)$$

其中, E_1, E_h 分别为 1 阶原点矩和 h 阶中心矩。仿真证明, $n < 6$ 时, $h \leq 3$; $n \geq 6$ 时, h 仅需取 4 或 5。

根据可能性与概率的一致性原理^[25], 可将式中模糊隶属度 μ_i 转化为与随机变量 p_i 相关的函数, 转换方式为:

$$\mu_i = \lambda m_i \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{1}{\max(m_i)} \quad (6)$$

其中, m_i 为设备失效率。其离散形式为:

$$m_i = m_{ui} m_{li} = \sum_{k=1}^i p_{ik} \sum_{k=1}^i p_{lk} \quad (7)$$

其中, m_{ui} 为暂降持续时间导致的设备失效率, m_{li} 为暂降幅值导致的设备失效率。

式(7)是暂降发生在区域 A 时的由暂降幅值和持续时间同时确定的设备失效率, 可见 m_i 是变量 p_i 的函数, 因此得 $g(p_i) = m_i / \max(m_i)$ 。

当暂降发生在区域 B, C 时, 式(7)中仅含持续时间或幅值引起的分量。

3.2 模型求解

式(3)、(4)确定的模型可用近似规划法求解^[26], 基本思想为: 把目标函数、约束条件近似为线性函数, 并对变量取值范围加以限制, 将问题转化为近似线性规划问题, 再用单纯形法求解; 选取满足约束条件的一个解作为近似初解进行迭代求解。规划步骤如下。

a. 给定模型求解的初始可行点 $X^1 = [P^1 \ U^1] = [p_1^1 \ p_2^1 \ \cdots \ p_n^1 \ u_1^1 \ u_2^1 \ \cdots \ u_n^1]$, n 的取值与混合熵模型的取值相同, 步长限制 $\delta^1 = [\delta_1^1 \ \delta_2^1 \ \cdots \ \delta_n^1]$, 维数与 X 相同, 步长缩小系数 $\gamma \in (0, 1)$, 允许误差 ε 与 X 维数相同, 令 $k=1$ 。本文的初始值可任选, 只要满足约束条件即可, 当 $n=6$ 时, 可以取 $[1/6, 1/6, 1/6, 1/6, 1/6, 1/6, 1/6, 2/6, 3/6, 4/6, 5/6, 1]$, 前 6 个值为 p 的初始值, 后 6 个为 μ 的初始值。限制步长是为了使泰勒级数一阶展开有较高的近似度, 但可能导致结果不满足约束条件, 此时需缩小步长, 因此引入步长缩小系数。

b. 在可行点处, 将目标函数与约束条件按泰勒级数展开并取一阶近似, 得到近似线性规划问题。

c. 在所得近似线性规划问题上增加一组限制步长的线性约束条件。因为线性近似通常只是在展开点有较高的近似程度, 故需要对变量的取值范围加以限制。增加的约束条件为 $|X - X^k| \leq \delta^k$, 然后求解该线性规划问题, 得到最优解 X^{k+1} 。

d. 检验 X^{k+1} 对于原约束是否可行。若可行, 则转步骤 **e**; 否则, 缩小步长限制, 令 $\delta^{k+1} = \gamma \delta^k$, 返回步骤 **c**, 重新求解当前的线性规划问题。

e. 判断精度 $|\delta^k| < \varepsilon$, 则点 X^{k+1} 为近似最优解; 否则, 令 $\delta^{k+1} = \gamma \delta^k$, $k = k + 1$, 返回步骤 **b**。精度判据为 ε ,

是预先设置的 p_i 和 μ_i 允许误差。

本文目标函数和约束条件对应为式(3)、(4), 步长缩小系数选取为 0.5。步长缩小系数过大会导致迭代次数太多, 收敛慢, 选择过小可能导致结果不收敛, 本文误差 ε 各分量允许值为 0.0001。

4 设备暂降失效率评估方法

IEC61508 规定: 失效是功能单元失去实现其功能的能力; 在执行功能时, 某些特定行为是不允许的, 这些行为的出现就是失效; 按严重程度, 可将失效分为完全失效和部分失效。因此, 针对实际中设备可能完全故障, 可能不完全故障, 用失效率定量度量事件。

根据样本和图 2 进行的样本分类, 可分别定量估计由随机性、模糊性和交叉不确定性引起的设备失效率。假设这 3 类样本在总样本中的比例分别为 w_1, w_2 和 w_3 , 求得的设备失效率分别为 m_x, m_y, m_d , 则设备总失效率为:

$$F = w_1 m_x + w_2 m_y + w_3 m_d \quad (8)$$

设备电压暂降引起的失效率具体评估方法如下:

a. 根据实测样本, 确定敏感设备 VTC 不确定区间的边界值;

b. 由实测样本数据获得耐受能力样本, 得到混合熵模型的约束条件;

c. 最大化混合熵值, 得到设备 VTC 概率分布和故障程度隶属度;

d. 对样本分类, 分别求取 3 类样本造成设备的失效率;

e. 结合各类样本所占比例, 用式(8)求设备总失效率。

5 算例分析

5.1 样本实测结果

用 Fluke 6100A 和线性功率放大器作电压暂降源, 以 2% 电压幅值和 5 ms 持续时间为步长产生扰动, 对 PC 机进行测试, 得到不同工况下 PC 机响应的散点图, 如图 3、4 所示。

可见, 设备全速运行时, VTC 的不确定性区间为 0.075~0.095 s, 47%~55%; 待机状态时, 不确定性区间为 0.105~0.135 s, 41%~49%; 运行状态处于两者之间时, 不确定性区间也位于相应不确定性区间之间。因此, 该设备 VTC 的不确定性区间为 0.075~0.135 s, 41%~55%。表 1 为设备耐受能力的不确定区间结果。

5.2 评估结果与现有方法比较

仿真结果表明, 选取样本越多, 结果与实际越接近。当样本数为 80 时, 就已可确保误差在 10% 以内。将本文方法与随机法、模糊法进行比较, 结果如

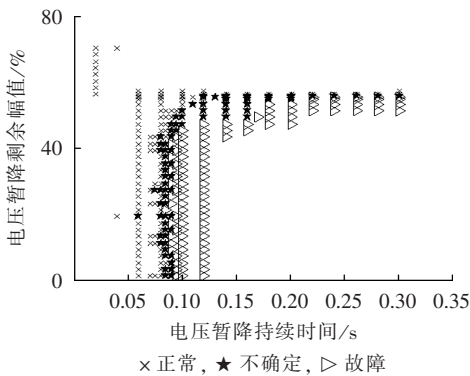


图 3 计算机全速运行时实测耐受能力散点图

Fig.3 Scatter diagram of tolerance level of PC in operation

表 1 设备 VTC 的不确定区间

Tab.1 Uncertainty region of equipment VTC

测试设备	$U_{\min}/\%$	$U_{\max}/\%$	$t_{\min}/s$	$t_{\max}/s$
PC 机	41	55	0.075	0.135

表 2 所示,表中幅值为标么值, α 为实测设备失效率, β 为评估结果,相对误差 s 定义为:

表 2 PC 待机状态下设备电压暂降敏感度评估与实际测试结果比较

Tab.2 Comparison of voltage sag sensitivity of PC in standby between evaluation and test

电压暂降特征		$\alpha/\%$	本文方法		随机评估法		模糊评估法	
幅值	持续时间/s		$\beta/\%$	$s/\%$	$\beta/\%$	$s/\%$	$\beta/\%$	$s/\%$
45	0.120	10.92	10.76	-1.4652	14.30	30.9524	4.26	-60.9890
*	0.115	12.80	14.01	9.4531	17.85	39.4531	6.63	-48.2031
*	0.120	27.10	27.45	1.2915	32.39	19.5203	20.04	-26.0517
*	0.125	46.58	46.15	-0.9231	51.08	9.6608	37.92	-18.5917
*	0.130	64.89	64.49	-0.6164	72.95	12.4210	54.16	-16.5657
47	*	24.02	26.20	5.0197	33.33	33.6245	19.06	-23.5850
45	*	65.74	58.98	-9.1564	70.00	7.8216	45.76	-29.5301

注:* 表示该特征量对于设备不产生影响,如暂降发生在区域 B 时暂降幅值对设备无影响。

性、模糊性和交叉不确定性,因此结果更符合实际。

6 结论

a. 从设备电压暂降失效事件的物理本质出发,用随机性、模糊性和交叉不确定性综合描述设备失效状态,更符合客观事实。

b. 用混合熵刻画设备失效事件的复杂不确定性,并用最大混合熵模型定量确定失效概率和失效严重程度,使复杂不确定性问题可以得到定量解决。

c. 用实测样本验证了本文方法的正确性、可行性,并与现有方法比较证明,混合熵评估方法能综合考虑设备失效事件的发生与失效严重程度的不确定性,且评估结果更符合实际。

本文提出的方法不仅可用于解决电压暂降引起的设备失效事件的复杂不确定性评估问题,对于分析和刻画电力系统中诸多不确定现象具有一定参考价值。针对不同物理现象,不确定变量和混合熵模型中的约束条件选取还需进一步研究。

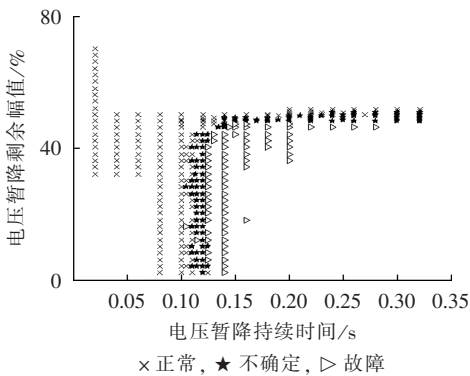


图 4 计算机待机状态下实测耐受能力散点图

Fig.4 Scatter diagram of tolerance level of PC in standby

$$s = \frac{\beta - \alpha}{\alpha} \times 100\% \quad (9)$$

由表 2 可见,由于随机法认为设备仅存在正常与完全失效 2 种状态,忽略了中间状态,因此评估结果偏严重;模糊法忽视了设备工作状态、带负载的随机性,因此出现欠估计;而本文方法全面考虑了随机

参考文献:

[1] 肖先勇,陈卫东,杨洪耕,等. 以用户满意度为区间数为测度的电压暂降频次评估[J]. 中国电机工程学报,2010,30(16):104-110. XIAO Xianyong, CHEN Weidong, YANG Honggeng, et al. Voltage sag frequency assessment under the measure of interval data of customer satisfaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 104-110.

[2] 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):7-10,16. XIAO Xianyong, XU Peidong, CHEN Weidong, et al. Interval evaluation of voltage sag magnitude and frequency in distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(9): 7-10, 16.

[3] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京:中国电力出版社,2010: 118-119.

[4] Standards Australia. IEC61000-1-1 ElectroMagnetic Compatibility (EMC), part I: general, section 1: application and interpretation of fundamental definition and terms[S]. Strathfield, Australia: Standards Australia International Ltd., 2000.

[5] 袁晓东,雷刚,顾文,等. 基于模糊逻辑的电压暂降能量指标[J]. 电力自动化设备,2009,29(3):105-109. YUAN Xiaodong, LEI Gang, GU Wen, et al. Energy index of

- voltage sag based on fuzzy logic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 105-109.
- [6] 肖先勇,李政光,陈武,等. 考虑故障阻抗和多级变压器影响的电压凹陷评估[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 43-47, 52.
- XIAO Xianyong, LI Zhengguang, CHEN Wu, et al. Voltage sag assessment considering fault impedance and cascaded transformers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 43-47, 52.
- [7] DJOKIC K Z, DESMET J, VANALRNE G, et al. Sensitivity of personal computers to voltage sags and short interruption[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 375-383.
- [8] 赵泓,肖先勇,李政光,等. 敏感设备电压暂降失效率区间最大混合熵评估[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(10): 70-75.
- ZHAO Hong, XIAO Xianyong, LI Zhengguang, et al. Estimation of maximum interval hybrid entropy of sensitive equipment failure rate due to voltage sag[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10): 70-75.
- [9] OLGUIN G. Voltage dip(sag) estimation in power systems based on stochastic assessment and optimal monitoring[D]. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2005.
- [10] WAGNER V E, ANDRESHAK A A, STANIAK J P. Power quality and factory automation[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1990, 26(4): 620-626.
- [11] 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.
- [12] 陈卫东,肖先勇,李皖,等. 敏感负荷电压凹陷敏感度的最佳平方逼近评估法[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 55-59.
- CHEN Weidong, XIAO Xianyong, LI Wan, et al. Voltage sag sensitivity assessment of sensitive equipments by optimal square approximation[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 55-59.
- [13] DJOKIC K Z, STOCKMAN K, MILANOVIC J V, et al. Sensitivity of AC adjustable speed drives to voltage sags and interruption[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 494-505.
- [14] DJOKIC K Z, MILANOVIC J V, KIRSCHEN D S. Sensitivity of AC coil contactors to voltage sags, short interruption, and undervoltage transients[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(3): 1299-1307.
- [15] MARTINEZ J A, MARTIN-ARNEDO J. Voltage sags studies in distribution networks part II: voltage sag assessment[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1679-1688.
- [16] MILANOVIC J V, GUPTA C P. Probability assessment of financial losses caused by interruptions and sags, part I: the methodology[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 918-924.
- [17] 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.
- [18] 倪伟,杨京燕,肖湘宁. 计及电压暂降的配网可靠性评估负荷停运的处理方法[J]. 现代电力, 2003, 20(6): 40-43.
- NI Wei, YANG Jingyan, XIAO Xiangning. Method of load-off in the reliability analysis of distribution network taking into voltage sags[J]. Modern Electric Power, 2003, 20(6): 40-43.
- [19] SHEN C C, LU C N. A voltage sag index considering compatibility between equipment and supply[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(2): 996-1002.
- [20] 肖先勇,马超,杨洪耕,等. 用电压暂降严重程度和最大熵评估负荷电压暂降敏感度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 115-121.
- XIAO Xianyong, MA Chao, YANG Honggeng, et al. Stochastic estimation of equipment sensitivity to voltage sag based on voltage sag severity index and maximum entropy principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 115-121.
- [21] 史玉峰,史文中,靳奉祥. GIS 空间数据不确定性的混合熵模型研究[J]. 武汉大学学报, 2006, 31(1): 82-85.
- SHI Yufeng, SHI Wenzhong, JIN Fengxiang. Hybrid entropy model of spatial data uncertainty in GIS[J]. Journal of Wuhan University, 2006, 31(1): 82-85.
- [22] 孙永厚,周洪彪,黄美发,等. 几何产品测量不确定度的混合熵评定方法[J]. 机械设计与研究, 2008, 24(4): 67-68.
- SUN Yonghou, ZHOU Hongbiao, HUANG Meifa, et al. Evaluation method of geometric product measurement uncertainty based on hybrid entropy[J]. Machine Design and Research, 2008, 24(4): 67-68.
- [23] 刘艳芳,兰泽英,刘洋,等. 基于混合熵模型的遥感分类不确定性的多尺度评价方法研究[J]. 测绘学报, 2009, 38(1): 82-87.
- LIU Yanfang, LAN Zeying, LIU Yang, et al. Multi-scale evaluation method for uncertainty of remote sensing classification based on hybrid entropy model[J]. Acta Geodaetica ET Cartographica Sinica, 2009, 38(1): 82-87.
- [24] 尚修刚,蒋慰孙. De Luca-Termini 混合熵的合理性分析及其推广[J]. 华东理工大学学报, 1996, 23(5): 590-595.
- SHANG Xiugang, JIANG Weisun. Reasonableness analysis and generalization of the hybrid entropy proposed by De Luca and Termini[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 1996, 23(5): 590-595.
- [25] 李洪兴. 不确定性系统的统一性[J]. 工程数学学报, 2007, 24(1): 1-20.
- LI Hongxing. The united theory of uncertainty systems[J]. Chinese Journal of Engineering Mathematics, 2007, 24(1): 1-20.
- [26] 程耿东,许林. 基于可靠度的结构优化的序列近似规划算法[J]. 计算力学学报, 2006, 23(6): 641-646.
- CHENG Gengdong, XU Lin. Sequential approximate programming approach to reliability based structural optimization[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2006, 23(6): 641-646.
- [27] YIN Shihan, CHANG Rungfang, LU Channan. Reliability worth assessment of high-tech industry power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 359-365.
- [28] AUNG M T, MILANOVIC J V. Stochastic prediction of voltage sags by considering the probability of the failure of the protection system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1): 322-329.

作者简介:



杨 达

杨 达(1987-),男,辽宁沈阳人,硕士研究生,研究方向为电能质量与智能电网(E-mail:snrtdp@126.com);

肖先勇(1968-),男,四川宜宾人,教授,博士,长期从事电能质量与智能电网的教学和研究工作(E-mail:xiaoxianyong@163.com);

汪 颖(1981-),女,重庆人,博士研究生,研究方向为电能质量与智能电网(E-mail:

scuwangying@163.com)。

(下转第 117 页 continued on page 117)

- 22(4):1489-1498.
- [11] MEYER E,ZHANG Zhiliang,LIU Yanfei. An optimal control method for Buck converters using a practical capacitor charge balance technique[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008,23(4):1802-1812.
- [12] 陈乐柱,刘雁飞. 基于电容电荷平衡的 DC/DC 变换器的数字控制算法[J]. 电工技术学报,2009,24(5):80-85.
- CHEN Lezhu,LIU Yanfei. Digital control algorithms for DC/DC converters based on capacitor charge balance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(5):80-85.
- [13] COSTABEBER A,CORRADINI L,MATTAVELLI P,et al. Time optimal,parameters-insensitive digital controller for DC-DC Buck converters[C]//Power Electronics Specialists Conference. Rhodes,Greece:IEEE,2008:1243-1249.
- [14] CORRADINI L,COSTABEBER A,MATTAVELLI P,et al. Parameter-independent time-optimal digital control for point-of-load converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009,24(10):2235-2248.
- [15] JIA Liang,WANG Dong,FU Jizhen,et al. A novel parameter-

independent digital optimal control algorithm for DC-DC Buck converters based on parabolic curve fitting[C]//Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE). Atlanta,Georgia:IEEE, 2010:500-507.

- [16] KAPAT S,KREIN P. Improved time optimal control of a Buck converter based on capacitor current[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2012,27(3):1444-1454.

作者简介:

毕 凯(1987-),男,山东淄博人,硕士研究生,研究方向为开关功率变换器的稳定性分析与控制(E-mail:bbk52@163.com);

周雄维(1954-),男,四川都江堰人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力电子技术、电路理论及应用;

卢伟国(1977-),男,浙江丽水人,副教授,博士,研究方向为开关功率变换器的稳定性分析与控制等;

栗安鑫(1984-),男,河南周口人,硕士研究生,研究方向为开关功率变换器及其控制。

Quasi-optimal control based on ripple current modulation for Buck converter

BI Kai,ZHOU Luowei,LU Weiguo,LI Anxin

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,
Chongqing University,Chongqing 400044,China)

Abstract: A PWM modulation strategy based on ripple current is presented,which takes the capacitor current as the main modulation signal to realize the nonlinear control of converter dynamic regulation process approaching to the TOC(Time Optimal Control) operating locus. With Buck converter as an example, its control equation based on the capacitor current modulation is derived and its corresponding analog control circuit is built. The dynamic response of converter is theoretically analyzed and the approximate analytical values of output voltage drop corresponding to dynamic regulation time are given. Simulative and experimental results prove that,the dynamic response of converter is approaching to the TOC operating locus,which verifies that,the proposed control strategy has excellent dynamic response to realize the quasi-optimal control of fast converter regulation.

Key words: Buck converter; capacitor current; nonlinear control; quasi-optimal dynamic performance

(上接第 111 页 continued from page 111)

Assessment of equipment invalidation due to voltage sags considering uncertainties of failure and severity

YANG Da¹,XIAO Xianrong²,WANG Ying¹

(1. College of Electrical Engineering and Information Technology,Sichuan University,Chengdu 610065,China;

2. Smart Grid Key Lab of Sichuan Province,Sichuan University,Chengdu 610065,China)

Abstract: The complicated uncertainty of equipment failure due to voltage sag and its severity are comprehensively considered. The failure samples are classified into three categories:random failure,fuzzy failure and cross uncertain failure,and their uncertainties are measured respectively by random entropy,fuzzy entropy and cross entropy. A maximum hybrid entropy assessment model is established and solved by the approximate programming. The comprehensive assessment of equipment failure rate is based on the equipment failure rates obtained by the quantitative uncertainty assessment and the corresponding weights. The assessment results show that,the proposed approach avoids both over-estimation and under-estimation existing in current assessment methods.

Key words: electric equipments; failure rate; voltage sag; randomness; fuzziness; cross uncertainty; maximum hybrid entropy model