

复杂性测度分析在电力电子电路故障预测中的应用¹

吴为麟 朱 宁

(浙江大学电气工程学院 杭州 310027)

摘 要 在高电压、大电流高频电路的情况下,对电路检测和监视有一定的困难。作者引入了一种新的复杂性分析的方法,利用综合性信号监测电路故障状态。与传统的方法相比,该方法具有快速、简便、经济、安全、非破坏性等优点,可作为电路系统可靠性预测的手段。

关键词 复杂性,混沌,电力电子电路故障预测

中图分类号 TN062

1 复杂性的介绍

目前,随着非线性科学的发展,关于复杂系统以及复杂性科学的讨论成为国内外的热点,复杂性研究已成为跨越众多学科领域的课题。复杂性是对对象复杂程度的客观度量。复杂性理论与非线性研究密切相关,非线性是产生复杂行为的来源^[1]。

复杂性是一个相对于简单性和随机性而言的概念。简单性一向是现代自然科学、特别是物理学的一条指导原则。以前,对于低自由度的或者是中心极限定理能够适用的高自由度系统,总是对它们做简化处理,通常是线性化处理。但随着科学的发展,研究者们,尤其是物理学家的研究者逐渐认识到,这样的简化处理在非线性动态系统中难以保持系统的本质不变。复杂性的概念就是在这种背景下被提出的。

现在人们已普遍认为,“复杂”是人类在 21 世纪的首要研究方向。Kolmogorov 在 1965 年定义了第一个符号序列复杂性^[1],也是目前最常用的复杂性概念之一,由 Ziv 和 Lempel (1974) 给出能够由计算机实现的具体算法^[1]。Kolmogorov 复杂性也被称为算法复杂性 (Algorithmic Complexity),这种算法反映了时间序列的随机程度。它描述为一个模式的算法复杂性,就是重现一个模式的算法的最短长度。类似于香农熵或动态熵,认为完全有序的复杂性最低,完全随机的最复杂。随着非线性科学的发展,人们发现这些算法可以用于检验非线性科学中的混沌现象。

2 复杂性的引入

复杂性测度的研究在理论上已有了很多有益的成果。我们这里着重强调的是序列复杂性,而非结构复杂性的研究。它主要用于处理非平稳过程中异常混乱不能用频谱分析的信号的非线性序列。它可以有效地区分有序的和无序的,以及看似无序实则有规律的信号。在某些领域中,如军事、生物等等,它的研究取得了突破性进展,实现了实际的运用,并有很好的效果。这无疑使得复杂性的应用前景变得明朗。比如,对脑电波的分析,使用经典的频谱分析、小波分析和神经网络等手段,是很难处理的;因为大脑内部结构复杂,而我们又只能在外部测取一个综合性的信号。引入复杂性分析,人们可以判断出人的大脑是否出现病变,虽然这种方法还不足以区分到底是哪一个细胞或哪一区域组织出现了病变^[2]。在电路中,我们也遇到处理综合性信号的复杂序列的问题,没有复杂性分析的手段,我们几乎不可能得到有用的信息。长期以来,人们习惯于用各个独立测量点的信号做电路分析;通过下面的分析,我们将看到使用综合性信号的必要性和优势,它将有广阔的应用前景。

¹ 2001-11-19 收到, 2002-07-24 改回

在对电力电子装置的调试、试验、运行过程中需要对它们的运行状态监测,防止它们进入故障状态。以往都是采用直接取样方法,如测电压、电流波形等;这些方法固然直接、有效,但用于大功率、高电压的电力电子装置时,往往显得较为困难:高电压需要绝缘隔离、不同点的采样要考虑共地问题、更困难的是这些测取点的接入通常会改变系统的状态;有时因为互相关联、模块化而无法逐一测取。在形式上,这些困难与脑电的研究是类似的。因此,要判断系统的实际工作状态,就必须采取综合的措施;我们不得不将目光转向综合性信号的测取和分析。这种方法回避了前述的难点,而且对高电压、大容量电力电子设备外界的电磁波、声能、加速度进行数据采集都容易实现。

但是,这种处理方法将难点转移至对被采集信号的后期处理上。因为,在工业环境中,各种噪声源很多,要把有用的分析信号取出来十分困难。对这种非平稳信号的分析,尤其是故障先兆的提取,一直都是电力电子研究中的难点;我们的任务就是寻求外部信息与内部状态之间的关联性,借助现代化的测试和分析手段,达到状态的识别和诊断的目的。下面,我们将阐述电力电子故障中的非线性现象——混沌,说明将复杂性应用于电力电子电路状态分析的合理性。

3 典型电力电子电路中的非线性现象及故障

现代复杂性理论与混沌理论之间有着深刻的内在联系,其中最根本的一点,是基于非线性,非线性是复杂行为的源泉。混沌是看似无序实则有序的现象,而复杂性分析的优点就在于能将有用信号分出。复杂性分析被我们用于电力电子系统的状态分析,就是出于这个原因。下面我们来分析典型电力电子电路中的非线性现象及故障。

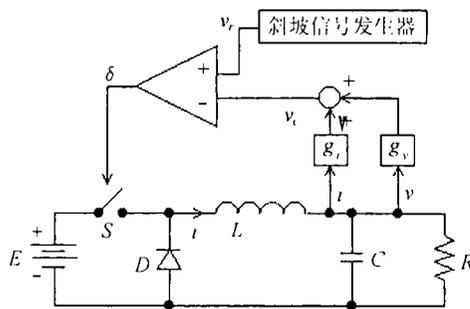


图1 闭环 Buck 变换器

电力电子电路中存在众多的非线性元件:如电子开关、变压器、非线性电容电感以及控制电路等,是一个非线性系统。这种非线性电路在周期信号的作用下,会使电路产生“混乱”运动。近年来,关于电力电子中的非线性现象的研究取得了一定进展,许多试验的结论已经表明,DC/DC 变换器会表现出混沌现象,而出现这种情况的电路通常是不稳定的^[3-7]。

拿典型的线路(图1)来作分析,每隔斜坡周期 T 观察一次系统,可以得到下面这个著名的离散模型,它适合所有 DC/DC 变换器的拓扑结构:

$$\begin{pmatrix} i_{n+1} \\ v_{n+1} \end{pmatrix} = A(\delta_n) \begin{pmatrix} i_n \\ v_n \end{pmatrix} + b(\delta_n)E \quad (1)$$

其中 i 表示电感电流, v 表示电容电压, E 表示固定的输入电压, δ 表示调制信号,斜坡电压为 $v_r(t) = \alpha + \beta(t \cdot \text{mod} T)$, δ_n 是开关状态。

$$A(\delta_n) = e^{A_{\text{on}}(1-\delta_n)T} e^{A_{\text{off}}\delta_n T} \quad (2)$$

$$b(\delta_n) = e^{A_{\text{on}}(1-\delta_n)T} A_{\text{off}}^{-1} [e^{A_{\text{off}}\delta_n T} - 1] b_{\text{off}} + A_{\text{on}}^{-1} [e^{A_{\text{on}}(1-\delta_n)T} - I] b_{\text{on}} \quad (3)$$

A_{on} , A_{off} , b_{on} 和 b_{off} 决定于拓扑结构,对于 Buck 电路,

$$A_{\text{on}} = A_{\text{off}} = \begin{pmatrix} 0 & -1/L \\ 1/C & -1/(RC) \end{pmatrix}, \quad b_{\text{off}} = (0, 0)^T, \quad b_{\text{on}} = (1/L, 0)^T \quad (4)$$

我们将 (4) 式称为 stroboscopic 映射。利用这种映射时, 由于控制回路的加入, 会导致很多问题。Mario di Bernardo 等人据此建立了一种新的 A-switching 映射, 以消去 $\delta_n^{[3]}$ 。令 $x_m = x(t_m) \in R$, 它是两个状态变量之一。利用这种映射, 可以把 $O(\lambda, v)$ 轨迹看作 $O(1, 1)$ 的不断迭代。 $O(\lambda, v)$ 是常见的混沌分析方法^[4], 表示 v 周期轨迹在每周期穿越斜坡的最大次数为 λ , 这种穿越通常表明一种不稳定。一般来说, 当沿着 $O(1, 1)$ 轨迹改变参数, 使得雅可比矩阵的特征值为 -1 的时候, 分支现象将会发生。

$$\det[J(x, \tau; E)] + \text{tr}[J(x, \tau; E)] + 1 = 0 \quad (5)$$

$$\tau_m = (t_m \bmod T) \quad (6)$$

雅可比矩阵可写成,

$$J = \begin{pmatrix} \partial t_{m+1} / \partial t_m & \partial t_{m+1} / \partial x_m \\ \partial x_{m+1} / \partial t_m & \partial x_{m+1} / \partial x_m \end{pmatrix} \quad (7)$$

分别推导出 $\det[J(x, \tau; E)]$ 和 $\text{tr}[J(x, \tau; E)]$, 数值求解系统, 就有可能得到第一个双周期分支发生的参数。考虑了 $O(1, 1)$ 这种简单情形, 我们就可以利用 A-switching 映射分析分支图。

无限局部扩展在 DC/DC 变换器中混沌行为有重要作用。这种类型的分支的特点是 A-switching 映射的雅可比矩阵的行列式值在 A-switching 时刻变成无穷大。文献 [8] 介绍了相空间中的无限局部扩展。总的来说, 在 PWM 周期内的任何时刻, 无限局部扩展都有可能发生; 对于 Buck 变换器来说, 只有在周期 T 的整数倍时候, 无限局部扩展才可能发生。

然而, 必须指出, 当 buck 变换器沿着混沌吸引子运动时, 在调制周期开始阶段控制信号会接近斜坡信号。我们可以用前述的局部无限扩展理论来解释初值敏感的混沌特性。每个周期的穿越次数取决于控制信号在 T 的整数倍时刻的时间导数。特别地, 如果控制电压在 nT 时刻以 β 斜率穿越斜坡, 我们就可以观察到控制电压在周期内有无限次穿越。

上面提到的我们已经通过实验进行检验, 图 2 表示了混沌吸引子, 是考虑了 A-switching 映射, 并且取 $g_i = 0$ 和 $g_v = 1$ 。图 2 中, 吸引子之间是空的, 这证明了在斜坡循环内, 无限局部扩展是不能满足的。从 A-switching 映射得到的吸引子结构, 证明了所有满足条件的轨迹是由于一致扩展。

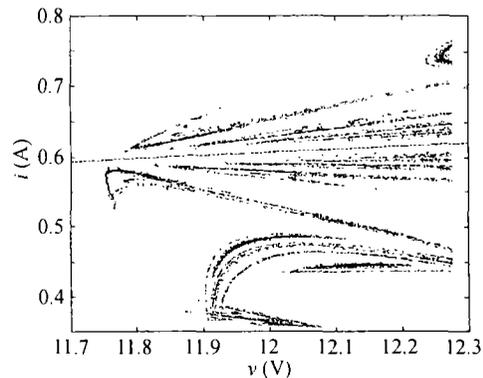


图 2 通过 A-switching 映射看到的
 $E = 35\text{V}$ 时变换器显示的吸引子

从上述分析, 我们可以得出结论: 变换器中的非线性现象是由反馈控制引起的; 变换器正常工作条件下的非线性不表现为混沌, 只有当 $O(\lambda, v)$ 轨迹中 $v > 1$ 时才发生混沌、分支现象; 也就是说, 系统的非线性与故障的非线性是不同的; 一些非线性现象例如分支和混沌在所有的 DC/DC 变换器中都存在, 而与拓扑结构和控制策略无关; 故障与非线性现象联系密切, 通常可以认为异常的控制信号和斜坡信号的穿越会导致故障的发生。

这说明, 混沌等现象可被认为包含了电力电子电路故障的先兆的信息。因此, 我们的工作就是用有效的手段来分析这种现象, 得到对我们有益的信息。因此, 复杂度算法的使用是合理的。

4 Kolmogorov 的复杂性方法

在非线性研究中, 有关复杂性分析方法有许多种, 比较有代表性的有 Kolmogorov 的算法复杂性 C_k , 拓扑熵, 广义维数 D 和李雅谱诺夫指数 L 等等. 本文主要用 Kolmogorov 的复杂性方法, 基本原理如下:

设有序列 $\{x_i\} = x_1, x_2, \dots, x_n$, 这一符号序列是按下列规律得到的. 令

$$s_i = \begin{cases} 1, & x_i \geq \bar{x} \\ 0, & x_i < \bar{x} \end{cases} \quad (8)$$

其中 $\bar{x} = (x_1 + x_2 + \dots + x_n)/n$.

按 (8) 式, 我们可以把序列 $\{x_i\}$ 映射为序列 $\{s_i\} = s_1, s_2, \dots, s_n$, 其中 $s_i = 0$ 或 1 . 当 $\{x_i\}$ 是周期的, $\{s_i\}$ 也是周期的; 当序列 $\{x_i\}$ 是“乱的”, $\{s_i\}$ 也是“乱的”. 所以 Kolmogorov 认为 $\{s_i\}$ 的复杂性可以反应 $\{x_i\}$ 的复杂性. 如何衡量 $\{s_i\}$ 的复杂性?

复杂性也被称为算法复杂性. 它反映了序列接近随机的程度. 类似于香农熵或动态熵, 认为有序的不复杂, 完全随机的最复杂. Lempel 和 Ziv 定义了由有限集合的元素所构成的有限序列的复杂度 $C(n)$, 并且证明了 $C(n)$ 是 Kolmogorov 复杂性的一个很好的逼近. 证明过程详见文献 [9].

对于生成一个序列的过程, Lempel 和 Ziv 从所有可能的程序中总结出两种操作: 第一种是复制, 或者说是拷贝, 简单说来, 就是用序列的某个前缀生成更长的前缀; 第二种操作是插入, 即对已经生成的前缀添加一个符号, 任何一个长度为 n 的符号序列可以从空串开始, 用第二种操作生成, 但其最短的描述才是复杂性的度量. 具体计算步骤参考文献 [9].

Kasper 和 Schuster 根据 Lempel 和 Ziv 的研究, 推出算法复杂性 $C(n)$, 对于 $0, 1$ 序列的 $C(n)$ 都会趋向一个定值^[10]:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} C(n) = b(n) \equiv n/\log_2 n \quad (9)$$

则可以定义相对复杂性:

$$C_k(n) = C(n)/b(n) = (C(n)\log_2 n)/n \quad (10)$$

通常就是用这个函数来表达时间序列的复杂性. 由定义可以看出, 完全随机序列 $C_k(n)$ 趋向于 1, 而对于有规律的周期运动 $C_k(n)$ 趋向于 0, 对于这两种极端情况之间的行为 $C_k(n) \in [0, 1]$.

最后我们可以得到一个计算 C_k 的算法复杂性公式:

$$C_k = C(n)/b(n) \quad (11)$$

这是一个相对复杂性, 有规律的周期信号的复杂性为 0, 白噪声的复杂性为 1, 50Hz 等周期的噪声其复杂性为 0. 这就排除了规则的噪声干扰.

这种方法, 具有明显的物理意义, 对于上述噪声的特征有很好的分辨能力, 并且特别适合快速的计算机处理, 保证了故障预测的快捷性和有效性.

5 电路实验

为了检验非接触式检测的方法, 验证复杂性测度对电力电子电路故障预测的可行性, 我们做了一系列的实验:

我们选择了数千瓦级的高频逆变式等离子切割加工装置电源, 它的主电路就和前面所举的基本相同, 适用于前面的线路故障分析。事实上, 我们这种方法对不同拓扑结构和控制策略都是适用的。对逆变式等离子切割加工装置电源(空载输出 280V, 额定输出电流 30-50A) 进行的试验, 大致情况如下:

(1) 声能测试。采用丹麦 B&K 公司生产的 B&K2230 声能计进行声能测试。在距主变压器约 30cm 处装设了声能检测探头, 分别对背景噪声(电源不工作), 小电流工作状态(1-2A), 中电流工作状态(10A) 和大电流工作状态(30A), 正常工作状态和参数调偏的异常工作状态分别进行测取, 把所测信号经 A/D 变换送到计算机进行处理, 每次样本长度不小于 8k 点。

(2) 加速度测取。为了获得另一种非电接触的电路信号, 根据实验室已有装置, 采取了加速度传感器丹麦 B&K4370, 把它粘在逆变变压器磁心顺磁构造方向(这方向加速度的变化最大), 所测得的信号经 A/D 变换进入计算机。

(3) 无线电波测试。考虑到大功率装置在工作时一定会有较强的电磁波辐射我们改装了调频接收器, 在离电源 1m 处进行对调制信号的测试, 其余方法同上。

要说明的是, 异常的工作状态, 我们是通过调节反馈通道中的斜坡信号来表示的。在前面的电路分析中, 我们已经说明, 变换器中的非线性现象是由反馈控制引起的, 因为任何参数的漂移、失效都会反映在这里; 这种方法, 相当程度地等价了大多数的故障状态或故障先兆。实验结果列于表 1。

表 1 不同工况的算法复杂度

	次数	工况	算法复杂度 C_k		次数	工况	算法复杂度 C_k		次数	工况	算法复杂度 C_k
声能测试	1	背景噪声	0.093209	加速度测试	7	背景噪声	0.082243	电磁波测试	13	背景噪声	——
	2	小电流正常	0.307283		8	小电流正常	0.121845		14	小电流正常	0.221344
	3	小电流异常	0.540517		9	小电流异常	0.366545		15	小电流异常	0.697132
	4	中电流正常	0.401962		10	中电流正常	0.204132		16	中电流正常	0.230096
	5	中电流异常	0.779259		11	中电流异常	0.362058		17	中电流异常	0.622590
	6	大电流异常	0.751248		12	大电流异常	0.705121		18	大电流异常	0.701940

6 讨论

从实验数据看, 我们得到以下几个结果:

(1) 电源在正常和非正常(出现故障先兆)时被测量信号的复杂性测度有明显的区别。这成功地验证了复杂性对综合性信号的分析能力; 从另一个角度来说, 我们引入复杂性的尝试是成功的。

(2) 对算法复杂度 C_k 来说, 不同的测量方法, 不同的测量途径, 信号会不一样, 但从复杂性算法中都显示为相似的结论。当运行正常时, 复杂性测度都很低, 而有了事故先兆时复杂性测度又都较高。复杂性测度反映了事物内部结构的特征。

(3) 本方法为非电接触式地进行电路故障先兆的诊断, 是一种崭新的方法, 它与传统方法相比更快捷、简便、安全、无破坏也更经济。

(4) 本方法的采用有利于实现故障的自动监控。

(5) 如果进一步找到不同故障与复杂性测度的对应关系, 我们则可以准确地预测故障点, 这是我们未来的研究方向。但是这项工作是非常艰巨的。

本文的工作是初步的, 有许多地方有待改进; 本文的目的, 也是希望引起广大同行对此关注, 从而深入研究这个问题。

参 考 文 献

- [1] R. Wackerbauer, *et al.*, A comparative classification of complexity measures, *Chaos, Solitons & Fractals*, 1994, 4(1), 133-173.
- [2] 徐京华, 董勤业, 大脑皮层信息结构和精神分裂症, *生物物理学报*, 1996, 12(1), 103-108.
- [3] M. di Bernardo, Franco Garofalo, Luigi Glielmo, Switchings, bifurcations, and chaos in dc-dc converters, *IEEE Trans. on Circuits Syst.I*, 1998, 45(2), 133-141.
- [4] E. Fossas, G. Olivar, Study of chaos in the buck converter, *IEEE Trans. on Circuits Syst.I*, 1996, 43(1), 13-25.
- [5] J. H. B. Deane, D. C. Hamill, Analysis, simulation and experimental study of chaos in the Buck converter, *Proc. IEEE. PESC*, San Antonio, Texas, 1990, 491-498.
- [6] J. H. B. Deane, D. C. Hamill, Chaotic behavior in current-mode controlled dc-dc converter, *Electron. Lett.*, 1991, 27(13), 1172-1173.
- [7] D. C. Hamill, J. H. B. Deane, Modeling of chaotic DC-DC converters by iterated nonlinear mappings, *IEEE Trans. on Power Electron.*, 1992, 7(1), 25-36 .
- [8] C. J. Budd, A. G. Lee, Double impact orbits of a single-degree-of-freedom impact oscillators subject to periodic forcing of odd frequency, *Proc. Royal Soc. of London Ser.A—Mathematical, Physical and Engineering Science*, 1996, 452(1955), 2719-2750.
- [9] A. Lempel, J. Ziv, On the complexity of finite sequences, *IEEE Trans. on Information Theory*, 1976, IT-22(1), 75-81.
- [10] F. Kaspar, H. G. Schuster, Easily calculable measure for the complexity of spatiotemporal patterns, *Phsy. Rev. A*, 1987, 36(2), 842-848.

THE APPLICATION OF COMPLEXITY MEASURE ANALYSIS TO FAULT PREDICTION IN POWER ELECTRONIC CIRCUIT

Wu Weilin Zhu Ning

(*College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract In the condition of high-voltage, heavy-current and high-frequency electric circuit, there is a certain difficult to inspect and supervise the electric circuit. On introducing a new method of complexity measure analysis, the authors manage to inspect the circuit fault status by analyzing synthetic signal. Compared with the traditional method, the present method has the advantages of high speed, easy operation, less expenses, safety, no destruction, etc. and can be used as a reliability predicting measure for electric circuit system.

Key words Complexity, Chaos, Fault prediction in power electronic circuit

吴为麟: 男, 1944 年生, 教授, 主要研究方向: 电力电子, 非线性电路。
朱 宁: 男, 1979 年生, 硕士生, 主要研究方向: 电力电子, DSP。