

Buck 变换器拓扑指数改进算法及脆弱性分析

The Improved Calculation of Topological Index and Vulnerability Analysis for Buck converter

鲍春明, 王春芳

青岛大学自动化工程学院 (山东, 青岛, 266071)

Bao Chunming, Wang Chunfang

Qingdao University, School of Automation Engineering (Qingdao Shandong, 266071, China)

摘要: 基于拓扑指数的概念, 考虑到 Buck 变换器在连续工作模式 (CCM) 下的开关状态和占空比, 提出并计算了 Buck 变换器的广义拓扑指数, 通过对 Buck 变换器拓扑指数的改进计算, 量化了电路拓扑的不同支路以及变换器占空比对变换器脆弱性的影响, 进而将脆弱性分析拓展到电力电子电路拓扑的结构性故障的研究。利用 Matlab 软件仿真分析, 此方法的计算结果与仿真结果相符, 从而验证了此方法的有效性。

关键词: Buck 变换器 拓扑指数 开关状态 脆弱性分析

Abstract: Based on the concept of topological index, given the switch state and duty ratio for Buck converter operated in the CCM (Continuous Conduction Mode), it is proposed that Generalized Topological Index for Buck converter. Through the improvement of the topological index Buck converter is calculated, quantization the different branches of circuit topology and duty cycle on the operating characteristics of the Buck converter. Then extended the vulnerability analysis method to the study on the structural fault of power electronic circuit topology. Using Matlab software simulation and analysis, the calculation results agreed with the simulation results, which verified the effectiveness of the method.

Key words: Buck converter, Topological index, Switch state, Vulnerability analysis

中图分类号: TM 46 [文献标识码] A 文章编号: 1561-0349 (2014) 12-0031-04

1 引言

脆弱性研究, 是全球变化及可持续性科学领域关注的热点问题和重要的分析工具, 随着脆弱性研究受到越来越多的关注, 对脆弱性的概念和评价方法的研究日益深入^[1]。脆弱性这一概念源于对自然灾害的研究, 在地学领域 Timmerman P.(1981) 首先提出了脆弱性的概念。目前, 脆弱性这一概念已被应用到很多研究领域, 例如: 灾害管理、生态学、公共健康、气候变化、土地利用、可持续性科学、经济学、工程学等。

在电力系统领域, 电力系统脆弱性是用来描述系统在正常运行情况或各种随机因素的作用下, 系统承受干扰或故障的能力, 以及系统不能维持正常运行的可能趋势及其影响^[2]。专家学者们提出了各种各样的理论和模型来研究系统的脆弱性, 包括: 有向图矩阵分析法^[3]、风险分析法^[4]、故障链理论

基础分析法^[5]等。分子拓扑指数理论是建立在图的不变量基础之上的, 它试图以这个拓扑不变量与分子的理化性质及生物分子的活性建立某种对应关系^[6]。

文献 [7] 基于拓扑指数进行电网结构评价, 利用拓扑指数的结论, 分析了高压、中低压网络结构与性能之间的关系。文献 [8] 试图将拓扑指数计算模型引入到 Buck 变换器中来。具体方法是以拓扑指数找到 Buck 中的脆弱源, 从而对 Buck 变换器做稳定性保护, 但是并没有考虑到电力电子拓扑的开关状态和占空比等特点, 计算过程较为粗糙和简易。

本文首先介绍了拓扑指数的有关概念和结论, 在拓扑指数和脆弱性概念的基础上, 改进了 Buck 变换器拓扑指数的计算方法。通过对 Buck 变换器在连续工作模式 (CCM) 下的广义拓扑指数计算, 分析了它们的脆弱性, 使得 Buck 变换器的

脆弱性能定量计算和分析。

2 拓扑指数及物理意义

2.1 基本概念^{[9]-[10]}

定义 1: K 级非连接数 $P(G, K)$

设边集合 E 有 a 条边, 则 K 条边的子集总共有 C_a^K 个。

在这些子集中, 非邻接子集的数目称为集合 E 的 K 级非相邻连接数, 记为 $P(G, K)$, 并规定 $P(G, 1) = a$ (a 是图中边的数目)。

定义 2: 拓扑指数 $TI(G)$

图 G 的拓扑指数, 边集合 E 的所有子集中, 非邻接子集的数目 (子集中所有边都非邻接) 记为 $TI(G)$ 。

$$TI(G) = \sum_{K=1}^m P(G, K) \quad (1)$$

其中: $m = |V|/2$ ($|V|$ 为偶数时); $m = (|V|-1)/2$ ($|V|$ 为奇数时), $|V|$ 是节点的数目。

可以用图 1 说明如何根据定义 2 计算一个已知图的拓扑指数。

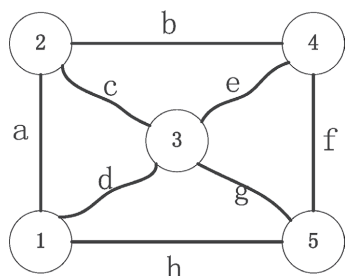


图 1 拓扑指数的计算示例图

如图 1 所示, 该图有 5 个节点 (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5), 则 $|V| = 5$; 有 8 条边 ($e_a, e_b, e_c, e_d, e_e, e_f, e_g, e_h$), 即 $|E| = 8$ 。与图 1 所对应的非邻接矩阵如式 (2) 所示, 行和列分别代表图 1 中的 8 条边, 矩阵中的元素为 1, 表示的是对应的边不相邻, 为 0 表示的是相邻。

$$A_u = \begin{matrix} & \begin{matrix} e_a & e_b & e_c & e_d & e_e & e_f & e_g & e_h \end{matrix} \\ \begin{matrix} e_a \\ e_b \\ e_c \\ e_d \\ e_e \\ e_f \\ e_g \\ e_h \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

由图 1 和式 (2) 可得, $m = (|V|-1)/2 = 2$, $P(G, 1) = 8$, $P(G, 2) = 10$, $P(G, 3) = P(G, 4) = 0$, 综合以上分析, 得到图 1 的拓扑指数为

$$TI(G) = \sum_{K=1}^m P(G, K) = 18 \quad (3)$$

2.2 拓扑指数的物理意义

对于某一具体网络, 拓扑指数的物理意义是度量该网络点和边 (电路拓扑的节点和支路) 连接均衡程度, 即与每个节点相连接的边数是否一致。拓扑指数越大, 则边分布的越均衡, 该网络的分散性越好。

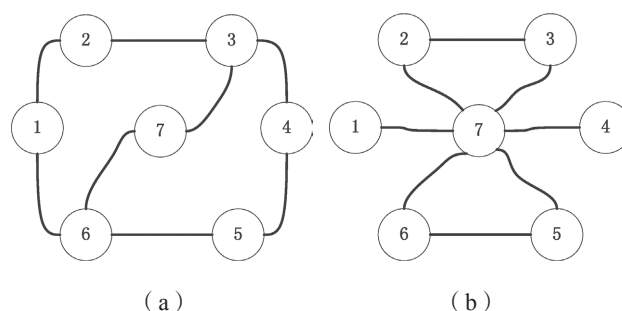


图 2 示例网络

由图 2 可知, 示例网络 (a) 和 (b) 是具有相同点数 (7 个) 和边数 (8 条) 的网络, 并且点的分布一致, 不同的是各个点之间的连接方式。直观的看, 网络 (a) 中每个点连接的边数为 2 条或 3 条, 比较均衡; 网络 (b) 中点 7 连接的边数是 5 条, 而点 1 和点 4 只有 1 条边与之相连, 每个点连接的边数差别较大, 不如网络 (a) 均衡度高。经过拓扑指数的计算: 网络 (a) 的拓扑指数为 33, 网络 (b) 的拓扑指数为 19。由此可知, 网络的拓扑指数表征了网络的分散程度和均衡程度, 拓扑指数越大, 分散度越好, 网络越均衡; 反之, 拓扑指数越小, 分散度越差, 网络越不均横。

对于拓扑指数的另一种理解: 拓扑指数越大的网络, 每个节点的重要性基本一样, 安全性较好, 某一点出现问题对于整个网络的影响相对较小。网络 (a) 中, 点 7 断开, 整个网络基本还是连通的; 对于网络 (b) 而言, 如果点 7 断开, 整个网络几乎解体。

由此可见, 一个网络是否安全可靠, 与它的拓扑指数的大小直接关系。电力电子电路可以抽象成一个电路网络, 或称为电路拓扑, 因此, 使用拓扑指数来衡量电路网络的脆弱性, 进而指导并优化电力电子电路的设计是可行的。

3 Buck 变换器拓扑指数和脆弱性计算

3.1 Buck 变换器的基本原理^[11]

Buck 变换器又称为降压斩波电路, 其基本结构如图 3 所示, 由输入电压 U_i (等效为直流电压源 U_i)、开关管 S 、二极

管 VD、电感 L 、电容 C 和等效负载电阻 R 构成。该电路存在电感电流连续和电感电流断续两种工作模式，本文只考虑电感电流连续工作模式下的情况。

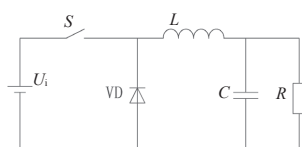


图3 Buck变换器的基本结构

Buck变换器在连续工作模式下有两个开关状态，如图4所示。开关状态1 (S_1)：开关管 S 导通，二极管 VD 关断。开关状态2 (S_2)：开关管 S 关断，二极管 VD 导通。定义占空比为 D ，是开关管导通的时间为 t_{on} 与开关周期 T_s 的比，即 $D=t_{on}/T_s$ ， $0 \leq D \leq 1$ 。

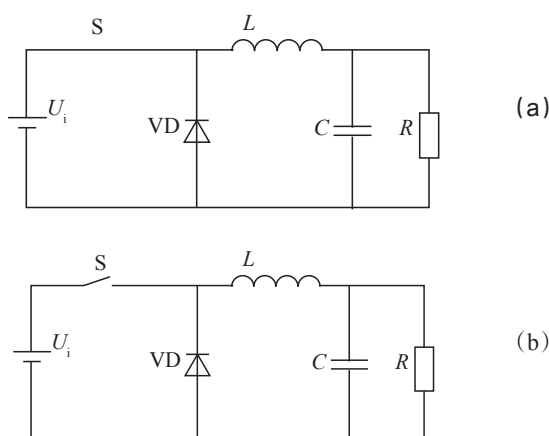


图4 Buck变换器的两种开关状态：(a) 开关状态1；(b) 开关状态2

3.2 Buck变换器的拓扑指数模型建立

Buck变换器的基本结构以及两个开关状态分别抽象为无向图。将输入电压 U_i 、开关管 S 、二极管 VD 、电感 L 、电容 C 以及等效负载电阻 R 抽象为节点 V ，它们之间的连线抽象为边 E 。得到其对应的无向图如图5所示。

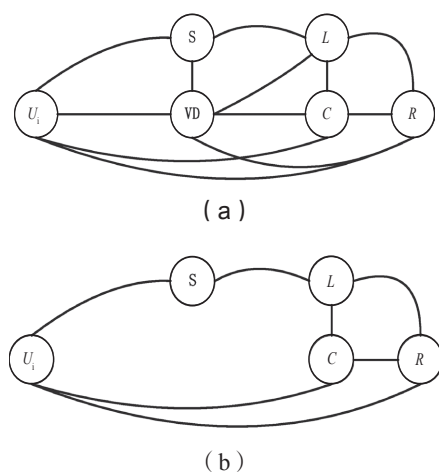


图5 (a) Buck变换器基本结构无向图，(b) 开关状态1 (S_1) 无向图，(c) 开关状态2 (S_2) 无向图

3.3 Buck变换器的拓扑指数计算与脆弱性分析

根据拓扑指数的定义，计算图5中3个无向图的拓扑指数：

Buck变换器基本结构对应的拓扑指数是 $TI(Buck)=49$ ；

开关状态1对应的拓扑指数是 $TI(S_1)=15$ ；

开关状态2对应的拓扑指数是 $TI(S_2)=9$ 。

由模型可见， S_1 时的拓扑指数比 S_2 时的拓扑指数大。由拓扑指数的物理意义可知， S_1 时的拓扑更加均衡，安全性更高。根据拓扑指数的概念，分析每个节点或元件在两个开关状态下对于变换器的影响，也就是不同结构性故障情况下变换器的脆弱性。得到拓扑指数计算式：

$$TI(A)=D \times TI(S_1, A) + (1-D)TI(S_2, A) \quad (4)$$

式(4)中， D 表示 Buck变换器的占空比， $0 \leq D \leq 1$ 。 A 表示某一节点或元件，如开关 S 、电阻 R 。另外，在拓扑中如果没有某一元件，则拓扑指数为零。如 S_1 下没有二极管元件 VD ，则 $TI(S_1, VD)=0$ 。此外，由于占空比的引入，广义拓扑指数的值可以是小数。

由此根据拓扑指数的定义和计算方法，得到不同元件在两个开关状态下的广义拓扑指数，见表1。

表1 元件在不同开关状态下的拓扑指数

元件	S	U_i	VD	L	C	R
开关状态1 (S_1)	7	5	0	5	6	6
开关状态2 (S_2)	0	0	3	3	3	3

根据式(4)可得：

$$TI(S)=7D, TI(U_i)=5D, TI(VD)=3-3D, TI(L)=2D+3, TI(C)=3D+3, TI(R)=3D+3。$$

不同元件对于变换器拓扑指数的影响是关于占空比 D 的函数，如图6所示。由图像可以看出： $0 \leq D \leq 0.375$ 时，在输入电压 U_i 发生损坏的情况下，拓扑指数最小，网络的均衡性差、可靠性降低，故 U_i 是脆弱源； $0.375 \leq D \leq 1$ 时， VD 是 Buck变换器的脆弱源。

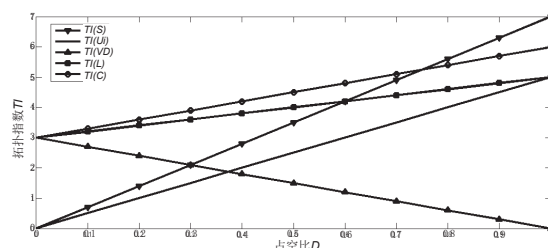


图6 不同元件对变换器拓扑指数的影响图像

使用 Matlab 对 Buck 变换器进行仿真, Buck 变换器的输入电压为 10V, 占空比为 0.5, 开关频率为 20kHz, 电感 L 为 2.2 mH, 滤波电容 C 为 470 μ F, 负载为 1 Ω 。如图 7 所示, 为二极管故障后二极管的端电压。在实际应用中, Buck 变换器经常会因为二极管的损坏, 导致开关管承受电感 L 产生的过电压而损坏; 二极管发生故障时, 导致电感等器件连锁损耗, 说明二极管 VD 是 Buck 变换器的脆弱源。因此, 不同的应用场合和参数条件下, 应尽可能保证二极管 VD 不发生故障。

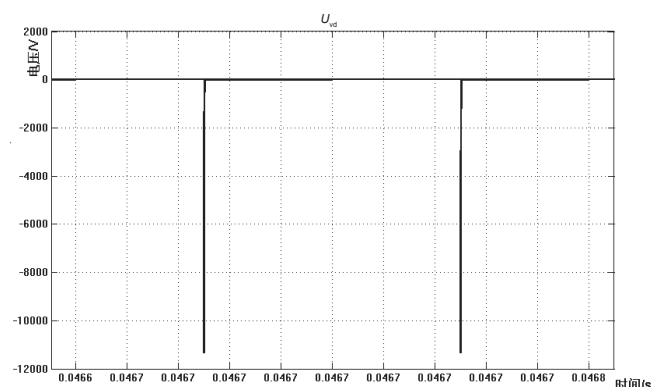


图 7 Buck 变换器二极管故障后的电压图像

4 结论

将拓扑指数引入到电力电子变换器的脆弱性分析中, 计算了在电感电流连续工作模式下 Buck 变换器不同开关状态的拓扑指数, 分析了由占空比决定的广义拓扑指数的特征; 通过对 Buck 变换器的广义拓扑指数的计算, 使 Buck 变化器脆弱性能定量计算和分析。引入占空比这一参数, 并且考虑到 Buck 变换器不同开关状态的影响, 使得拓扑指数的计算更加细化, 利于分析。该拓扑指数计算方法对于非隔离型变换器拓扑均适用, 但对于该变换器的电感电流断续工作模式(DCM)

以及含有变压器的隔离型变换器拓扑, 计算方法还需改进。

参考文献

- [1] 李鹤, 张平宇, 程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法 [J]. 地理科学进展, 2008, 27 (2): 18-25.
- [2] 魏震波, 刘俊勇, 朱国俊, 贺星棋, 龚薇. 电力系统脆弱性理论研究 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (7): 38-43.
- [3] Ivan J Sacks. Digraph Matrix Analysis [J]. IEEE Reliability Society, 1985, 34 (5): 437-446.
- [4] Alexis Kwainiski. Technology Planning for Electric Power Supply in Critical Events Considering a Bulk Grid, Backup Power Plants, and Micro-Grids [J]. IEEE System Journal, 2010, 4 (2): 167-178
- [5] Ansi Wang, Yi Luo, Guang Tu, and Pei Liu. Vulnerability Assessment Scheme for Power System Transmission Networks Based on the Fault Chain Theory [J]. IEEE Trans. On Power Systems, 2011, 26 (1): 420-450.
- [6] 杨锋, 罗明道. 分子拓扑指数的理论和应用 [J]. 自然杂志, 1997. 50-53.
- [7] 张李盈, 范明天, 田喜峰. 基于拓扑指数的电网结构评价 [J]. 山东电力高等专科学校学报, 2008
- [8] 张桂东, 张波, 丘东元, 肖文勋. Buck 变换器的拓扑指数及脆弱性分析 [J]. 电源学报, 2012 (06): 19-22
- [9] 兰家隆, 刘军. 应用图论及算法 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1995.
- [10] 卜月华. 图论及其应用 [M] 南京: 东南大学出版社, 2002.
- [11] 裴云庆, 杨旭, 王兆安. 开关稳压电源的设计和应用 [M] 北京: 机械工业出版社, 2011.

(上接第 47 页)

的 ATS, 可大大提升分散式 ATS 的使用寿命。

6 结束语

现代信息设备使用的主动功率因数调整电源供应器, 在输入电压瞬断后会产生大于额定值数倍的输入电流。而 ATS 进行转换时, 一定会造成电源供应器输入电压的瞬断。此大电流会造成传统使用继电器作为主要切换开关的 ATS 的损坏。

本文提出新的分散式 ATS 架构, 使用 SCR 来取代继电器作为开关。不仅可以大大增加 ATS 的寿命, 也可避免因转换

所产生噪声干扰设备的问题, 再搭配并联继电器的使用, 可以保持原本的高效率。

参考文献

- [1] VinayaSkanda; Microchip Technology Inc. "Power Factor Correction in Power Conversion Applications Using the dsPIC® DSC"
- [2] Walter Banzhaf: P.E. Professor of Engineering Technology University of Hartford Ward College of Technology "Contact Bounce of a Relay"