

基于深度优先搜索的潜在电路计算机辅助分析法

梅 义, 丘东元, 张 波

(华南理工大学电力学院, 广东省 广州市 510641)

Computer-aided Sneak Circuit Analysis Method Based on Depth-first Search Algorithm

MEI Yi, QIU Dong-yuan, ZHANG Bo

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: Sneak circuit analysis (SCA) is significant in system safety and reliability engineering, but SCA in power electronics systems is still in the manual analysis period. An computer-aided sneak circuit analysis method was studied for power electronics converters in this paper. Based on the matrix model of power electronics converter, all of the possible circuit paths in converter can be found out by the depth-first search algorithm. Then the sneak circuits can be identified by some criteria. A program was developed to realize the above process automatically. The proposed SCA method has the advantages of easy manipulation, short searching time, no redundant paths, high veracity, wide application, etc. It is also suitable for complex converters. Resonant switched-capacitor (RSC) converters were used as examples to validate the proposed SCA program. The operating results confirm its correctness.

KEY WORDS: sneak circuit analysis; graph theory; depth-first search; adjacency matrix

摘要: 潜在电路分析(sneak circuit analysis, SCA)对系统安全可靠运行有重大意义, 电力电子变换器的潜在电路分析处于手工分析阶段。该文对电力电子变换器潜在电路计算机分析方法进行研究。根据电路原理建立电力电子变换器矩阵模型, 由此采用深度优先搜索算法, 对变换器中所有可能的路径进行搜索, 再通过判断函数对搜索到的路径进行识别, 得到变换器中的潜在电路。基于该方法开发的计算机软件应用表明, 它具有方法简单、搜索时间短、无冗余路径、准确性高、通用性强等优点, 适用于复杂电力电子变换器的潜在电路分析。以谐振开关电容(resonant switched-capacitor, RSC)变换器为例, 验证提出的潜在电路计算机辅助分析方法的正确性。

关键词: 潜在电路分析; 图论; 深度优先搜索; 邻接矩阵

基金项目: 国家自然科学基金项目(50507004); 广东省自然科学基金项目(07006515)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50507004).

0 引言

潜在电路是一种随着电路设计而隐藏于电路中的电路路径或状态, 它只能工作在特定的电路条件下^[1]。潜在电路一旦被激发, 可能会产生非预期的功能, 或是抑制预期的功能, 引起系统故障, 甚至造成严重事故, 包括设备损坏和人员伤亡^[2]。由于潜在电路具有很大的危害性, 需对设计完成的电路进行潜在电路分析, 找出电路中存在的潜在电路。通过改进电路或破坏潜在电路的激发条件, 可有效减少潜在电路的危害^[3]。

目前, 国外已在航天、军事、通讯网络、核电等领域大量应用SCA^[4]。而该项技术在国内起步相对较晚, 到目前为止, 国内开发的潜通路分析系统有: 航天部 12 所开发的计算机辅助网络树生成系统 CANTGS、航天部 301 所、611 所和成都电子科技大学联合开发的计算机辅助潜通路分析软件 UEST-611-301 SCAS 等^[5-7]。这些自动化分析软件主要应用在航天领域, 而其他领域鲜有开展 SCA 研究^[8-10]。一直以来, 电力电子系统的安全可靠性工作主要集中在故障诊断方面^[11-12]。最近才发现电力电子系统中存在潜电路现象, 电力电子系统的潜电路研究才刚刚起步, 而且还停留在手工分析阶段^[13], 因此有必要开发一种适用于电力电子系统的潜在电路计算机分析软件, 以满足研究的需要。

本文首先介绍潜在电路计算机辅助分析法的思路, 然后根据图论建立电力电子变换器的邻接矩阵模型, 并在深度优先搜索算法的基础上探讨路径搜索和路径判断的算法实现。最后, 编制潜在电路计算机辅助分析软件, 并以降压式谐振开关电容变换器为研究对象, 利用该软件对其进行潜在电路分析。软件运行结果验证本文提出的潜在电路计算机

辅助分析方法的正确性。

1 潜在电路计算机辅助分析方法概述

变换器工作时的电流路径可分为正常电路和潜在电路。以图1所示的1/2降压式谐振开关电容变换器为例,根据该变换器的工作原理,路径 $U_s \rightarrow S_1 \rightarrow L_r \rightarrow C_r \rightarrow D_1 \rightarrow C_0(R_L)$ 为设计时期望得到的电流路径,即正常电路;而路径 $U_s \rightarrow D_2 \rightarrow C_r \rightarrow L_r \rightarrow S_1$ (S_1 的本体或寄生反向二极管或与 S_1 反并联的二极管)则是非期望得到的电流路径,也就是潜在电路^[14]。

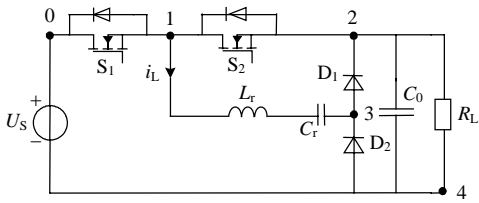


图1 1/2降压式谐振开关电容变换器
Fig. 1 1/2 step-down RSC converter

为研究变换器中存在的潜在电路,可先搜索出变换器中所有可能的电流路径,然后再判断这些电流路径中哪些是潜在电路。目前,电力电子变换器中电流路径的搜索和判断均采用手工分析,只能适用于复杂性不高、节点数不多的变换器。对复杂性较高、节点数较多的电路,手工分析的方法具有局限性^[15]。如图2所示的1/5降压式谐振开关电容变换器,若采用手工分析方法搜索电路中所有的电流路径并判断,工作量将非常大,而且由于整个过程由手工完成,结果易受到人为因素的影响,准确性不高,此外手工分析方法还有分析周期长的缺点。

若采用计算机完成路径查找和路径判断的过程,则能有效克服手工分析的缺点,实现快速、高效、准确的潜在电路分析。为此,本文提出潜在电路的计算机辅助分析方法,即采用邻接矩阵模型记录变换器的电路信息,利用深度优先搜索算法对变

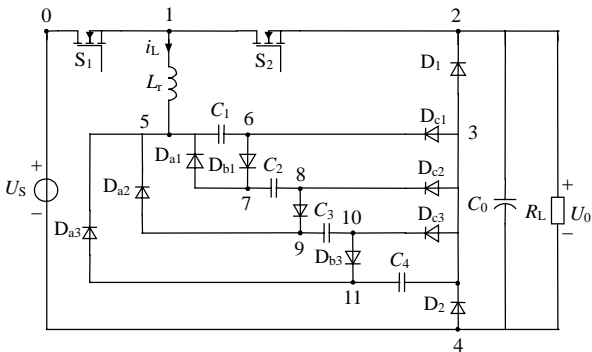


图2 1/5降压式谐振开关电容变换器
Fig. 2 1/5 step-down RSC converter

换器中所有电流路径进行自动查找,然后通过判断条件自动识别潜在电路,路径查找和路径识别的过程均由计算机实现。

2 路径搜索方法

2.1 变换器邻接矩阵模型

为利用计算机对变换器中的潜在电路进行分析,需要对变换器进行建模,将电路信息以一定的方式存储,以便计算机进行处理。

根据图论知识,网络的图是一些点集合和边集合组成的二元组。如果定义各电路元件的引脚为网络中的节点,电路元件为网络中的边,那么电路可由一个网络图来表示。为便于计算机资源对电路数据进行处理,可将电路图信息用矩阵的形式表示。图的矩阵表示形式有邻接矩阵、回路矩阵、割集矩阵及关联矩阵等。其中邻接矩阵的表示最简单直观,便于实现路径搜索,故本文选用邻接矩阵表示电路网络中的信息^[16]。

若电路有 n 个节点,电路网络的信息可由 $n \times n$ 阶方阵 $A=[a_{ij}]$ 来表示,其中 a_{ij} 表示电路中的边,描述的是电路网络中节点 i 和节点 j 间电路元件的电气特性, $i, j=0, 1, \dots, n-1$ 。 a_{ij} 的定义为

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{节点}i\text{至节点}j\text{之间存在直接通路} \\ 0, & \text{节点}i\text{至节点}j\text{之间不存在直接通路} \end{cases} \quad (1)$$

图1的1/2降压式谐振开关电容变换器具有5个节点,按照邻接矩阵的定义,其邻接矩阵模型为

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

将变换器采用邻接矩阵模型进行描述后,电路中的电流路径可由一组节点序列来表示,该节点序列中任意前后2个节点之间必须存在通路,否则电流将无法流通。例如1-2-4-3为该变换器中的一条电流路径,而1-2-3-4则不是一条电流路径,因为二极管 D_1 只能单向导电, $a_{23}=0$ 。用节点序列表示电流路径,既方便了路径的存储和读取,也使潜在电路计算机分析成为可能。

2.2 深度优先搜索算法

深度优先搜索是对图进行遍历的算法之一。图的遍历是指从某个指定的节点出发,按照一定的递归条件对图中所有节点做一次访问的过程^[17]。

首先选择图中任一未被访问过的节点为起始点开始搜索,若被搜索到的节点满足未被访问过,

则将该节点标记为已访问，同时以该节点为起始点继续搜索，如此反复，直至图中所有的节点均被访问。图 3 为图 1 变换器所对应的树图，节点之间的箭头方向表示 2 点之间是否存在电气通路，与图 1 的邻接矩阵模型相对应。若从节点 0 开始进行搜索，那么得到的节点访问次序为： $0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 3$ 。

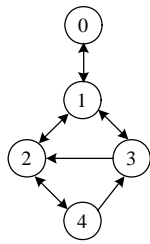


图 3 采用深度优先搜索算法的遍历图
Fig. 3 Traverse map based on depth-first search algorithm

为查找变换器中任意源点 i 至目标点 j 之间所有可能的电流路径，本文设计的搜索函数包括 2 个部分：①为深度优先搜索，找出电路网络中从源点出发的所有可能的路径；②为路径筛选与存储，即对搜索得到的路径进行筛选，存储从源点至目标点的路径。

考虑到电流路径不允许重复通过某一节点，以及找到目标点后不需再进行节点搜索，因此在搜索函数中可设置 2 个递归条件：①搜索到的邻接节点须与本条路径已经存储的节点不同；②搜索到的邻接点不为目标点。只有同时满足这 2 个递归条件时，才从该邻接点出发开始进行下一个节点的搜索，否则递归失败。若某次递归调用中搜索到的所有邻接节点都不满足递归条件，则程序回到上一层递归调用。

在这 2 个递归条件的帮助下进行深度优先搜索，可得到从源点 i 出发的所有路径。从这些存储的路径中筛选出结束点为目标点的路径，即可得到从源点到目标点的所有路径。

2.3 路径搜索策略

路径搜索策略是指如何利用搜索函数对变换器中所有的电流路径进行查找，并避免出现冗余路径。由于电源是一个电流路径不可缺少的部分，因此通过调用搜索函数查找每个电源(或能充当电源的元件)两个端(节)点间的路径，即可找出电路图中所有可能的电流路径。

电力电子电路中的元件可分为无源元件和有源元件。有源元件主要有电压源和电流源，无源元

件主要包括电阻、电容、电感等。有源元件一定可以充当电源，此外由于电感和电容能储存能量，在特定条件下也可看作电路的电源元件。因此，为找出电力电子变换器中所有可能的电流路径，须对电压源、电流源及电容和电感等能充当电源的元件两端节点间所有的路径进行搜索。

但简单对每个电源(或能充当电源的元件)两个端(节)点间的电流路径进行查找，将会出现某一条路径被重复查找的情况。以图 1 为例，对节点 0 和 4 间的路径进行搜索，得到其中一条路径为 $0-1-3-2-4$ ；再对电感 L_r (电容 C_D)两端的节点 1 和 3 进行搜索，得到其中一条路径为 $3-2-4-0-1$ 。虽然这 2 条路径的源点和目标点不同，但实质上为同一条电路。为避免出现这种冗余情况，可对电路中可充当电源的元件进行编号，然后按照编号的顺序分别对元件两端(节)点间的电流路径进行搜索，搜索完毕后的元件被设置为断路。通过这种编号搜索的方法可不重复地搜索出电路图中所有可能的电流路径。

3 路径判断方法

本文设计的路径判断方法思路是：将搜索到的电流路径及输入的判断条件均以节点序列形式存储在计算机中，然后利用判断条件对每条电流路径进行判断，若某条电流路径不符合所有判断条件时，则该路径为潜在电路。

路径判断条件分为 2 种：①是预处理条件；②是正常工作条件。预处理条件的作用是对电路实际运行中不允许或不可能出现的路径进行剔除。例如单相全桥逆变电路中要求上下桥臂开关管互补导通，故需设置一个预处理条件剔除含有上下 2 个开关管同时导通的路径。从预处理条件的定义可知，它不一定是完整的电路路径，可能只是完整电路路径中的一部分，因此它是判断潜在电路的局部条件。当待判断的路径中任一部分满足预处理条件时，该路径将被定义为虚假路径，排除于潜在路径之外。正常工作条件代表电路正常工作时的电路路径，与局部判断的预处理条件相比，它是整体条件。因此将待判断的路径与正常工作条件进行比较，当路径不与任一正常工作路径相符合时，才可能为潜在电路。

为保证输入的正常路径不受源点和目标点的限制，本文设计了路径移位功能，保证路径不变的情况下对输入的正常路径进行移位处理，即路径中

的数字序列可进行双向任意位数的移位。假设待判断的路径为 0-1-3-4-6-5-2-7, 而输入的正常工作路径之一为 4-6-5-2-7-0-1-3, 虽然这 2 条路径的源点和目标点不相同, 但将后者移位后作为判断条件, 仍可判断出 0-1-3-4-6-5-2-7 为正常路径。由于具备移位功能, 输入正常工作路径时, 可选取路径中任意 2 个相邻的节点作为源点和目标点。

4 潜在电路计算机辅助分析软件设计

4.1 软件运行原理

基于上述路径搜索和路径判断方法, 本文设计了潜在电路计算机辅助分析软件。该软件由搜索函数、主函数和判断函数 3 个部分构成, 如图 4 所示。搜索函数对电路中所有可能的电流路径进行查找; 判断函数根据判断条件对搜索到的电流路径进行辨别, 确定其是否为潜在电路; 主函数负责控制软件的整个运算流程, 同时完成电路网络邻接矩阵和判断条件等信息的输入。

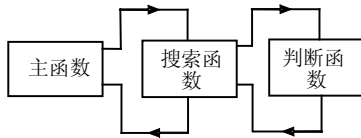


图 4 SCA 软件运行原理
Fig. 4 Principle of SCA software

4.2 搜索函数

搜索函数是本软件的核心部分, 它能对任意节点数的电路网络中任意 2 个节点之间的所有电流路径进行查找。

搜索函数的流程图如图 5 所示。文中以图 3 的树图为例, 介绍搜索函数的工作过程。

设源点为 0, 目标点为 4。首先在第 1 条路径中存储节点 0, 搜索函数以节点 0 为起始点开始搜索, 搜索到邻接节点 1, 经判断节点 1 满足 2 个递归条件, 因此在第 1 条路径中存储节点 1, 并以节点 1 为起始点进行搜索。通过节点 1 可找到一个邻接节点 0, 而节点 0 在本路径中已存储过, 因此其不满足递归条件, 本条路径搜索结束。得到从源点 0 出发的第 1 条路径为 0-1。由于递归结束的节点 1 不为目标点, 因此不将其作为目标路径进行 2 次存储。

继续搜索节点 1 的周边邻接节点, 经判断节点 2 也满足递归条件, 故在第 1 条路径中存储节点 2, 然后从节点 2 开始继续搜索。结果找到邻接节点 1, 同理由于节点 1 在本路径中已存储, 故其不满足递

归条件, 即递归失败。得到从源点出发的第 2 条路径, 为 0-1-2。由于递归结束的节点 2 不为目标点, 同样不将其作为目标路径进行 2 次存储。

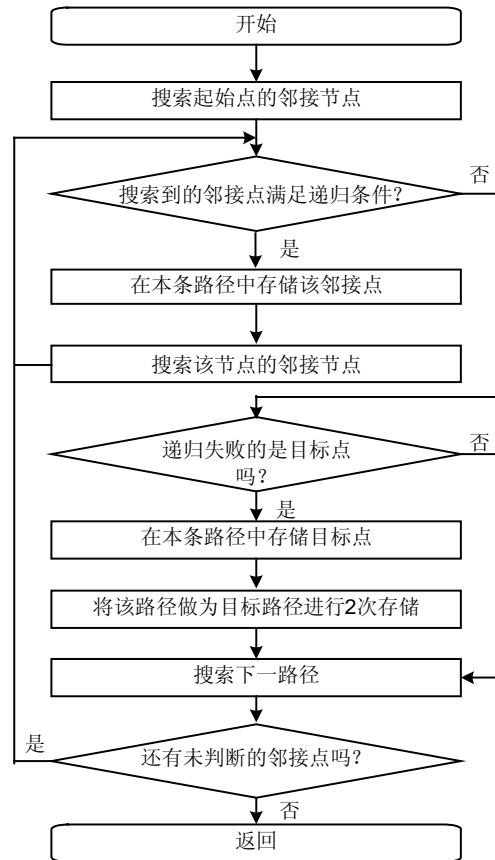


图 5 搜索函数的流程图
Fig. 5 Flow chart of search function

采用同样的方法, 可找出从节点 0 出发的所有路径为 0-1; 0-1-2; 0-1-2-4; 0-1-3; 0-1-3-2; 0-1-3-2-4。其中路径 0-1-2-4 和 0-1-3-2-4 符合目标点的要求, 故程序对它们进行了 2 次存储, 以便进行读取处理。

在其它路径查找的算法中, 如连接矩阵算法、逐点查找算法等, 都不可避免地出现节点在一条路径中重复使用的情况, 导致查找结果中出现数量可观的冗余路径, 虽然这些冗余路径也可通过判断条件进行剔除, 但不可避免地降低了电路分析的效率^[18]。而本文通过设置合适的递归条件, 搜索结果中将不会出现冗余路径。因此, 本搜索算法更为高效。

4.3 判断函数

判断函数根据主函数输入的判断条件, 对搜索得到的电流路径进行判断, 从而得到潜在电路。

对于电路图中所有可能的电流路径, 经预处理条件和正常工作条件判断, 不符合上述 2 类条件

的，则可认为是潜在电路。判断函数的流程图如图 6 所示。

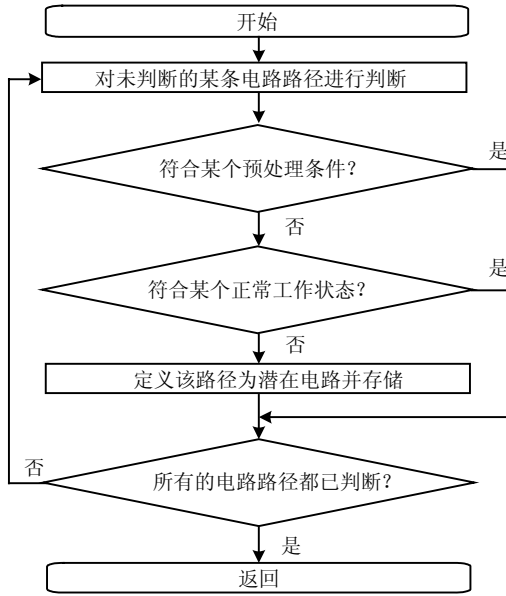


图 6 判断函数的流程图

Fig. 6 Flow chart of judge function

4.4 主函数

主函数的功能是对整个软件的流程进行控制，包括调用搜索函数和判断函数，输入电路网络节点数、邻接矩阵、预处理条件和正常工作条件等电路信息。图 7 为主函数的流程图。

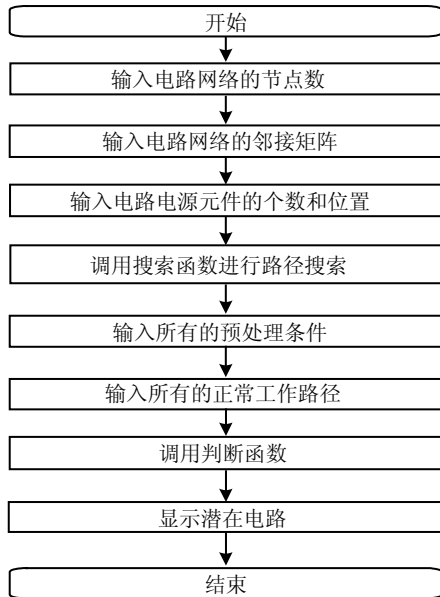


图 7 主函数流程图

Fig. 7 Flow chart of main function

5 应用实例

5.1 1/3 降压式谐振开关电容变换器

在 Dev-C++4.9.9.2 的平台下，本文编制了快速

潜在电路分析程序。以 1/3 降压式谐振开关电容变换器为例，对该软件运行结果进行验证，1/3 降压式谐振开关电容变换器如图 8 所示，共有 8 个节点，其邻接矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

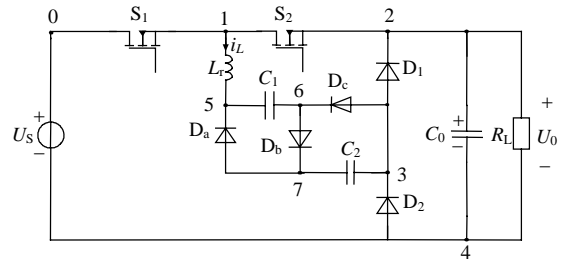


图 8 1/3 降压式谐振开关电容变换器

Fig. 8 1/3 step-down RSC converter

根据 2.3 节中的路径搜索策略，需对电路中的电源或储能元件进行编号。如将输入电压源 U_s 设为 1 号，谐振电感 L_r 设为 2 号，开关电容 C_1 、 C_2 分别设为 3 号、4 号，输出电容 C_0 设为 5 号(这些元件的编号次序可任意设置)。

根据 1/3 降压式谐振开关电容变换器的工作原理，开关管 S_1 和 S_2 的驱动信号为互补导通，二者不能同时导通；二极管 D_1 和 D_2 也不能同时导通，否则将使输出电容短路。由此可设置 3 个预处理条件：2-1-0，0-1-2，4-3-2。由串联谐振的规律，每个开关电容充电时电压的最大值为 $U_s - U_o$ ^[19]，该值小于电源电压 U_s ，因此单个开关电容不能对 U_s 反向充电，即单个开关电容不能通过 5-1-0 与 L_r 、 U_s 反向串联谐振，由此可设置预处理条件 5-1-0。经分析，正常工作路径有 3 条，其中开关电容串联充电的路径为 0-1-5-6-7-3-2-4；开关电容并联放电的路径为 1-2-4-3-6-5，1-2-4-3-7-5。

设计的潜在电路计算机分析软件的使用方法 & 运行结果如表 1 所示。按软件提示依次输入各项条件，程序运行后可得该电路中存在 4 条潜在电路，分别为：1-2-4-3-6-7-5，5-6-7-3-2-1，6-7-5，3-6-7。程序运行结果跟文献[14]

表1 1/3 降压式谐振开关电容变换器的潜在电路分析结果
Tab.1 SCA results of 1/3 step-down RSC converter

项目名称	输入或结果
电路节点数	8
电路的邻接矩阵	0 1 0 0 1 0 0 0
	1 0 1 0 0 1 0 0
	0 1 0 0 1 0 0 0
	0 0 1 0 0 0 1 1
	1 0 1 1 0 0 0 0
	0 1 0 0 0 0 1 0
	0 0 0 0 0 1 0 1
	0 0 0 1 0 1 0 0
	0 0 0 1 0 1 0 0
电源元件的个数	5
各个电源两端节点值	0 4; 1 5; 5 6; 7 3; 2 4
预处理条件个数	4
预处理条件	0-1-2; 2-1-0;
	4-3-2; 5-1-0
正常路径	0-1-5-6-7-3-2-4;
	5-1-2-4-3-6;
	2-4-3-7-5-1
	1-2-4-3-6-7-5;
电路中的潜在电路	5-6-7-3-2-1;
	6-7-5;
	3-6-7

的分析结果一致。

5.2 1/n 降压式谐振开关电容变换器

如图2所示的1/5 降压式谐振开关电容变换器共有12个节点,其邻接矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

根据变换器工作原理,预处理条件共有9个,其中开关管不能同时导通可设置3个预处理条件:0-1-2, 2-1-0, 4-3-2; 根据回路之间KVL约束关系可设置5个预处理条件:6-7-8-9-5, 6-7-8-9-10-11-5, 8-9-10-11-5, 10-11-3-8-9, 8-9-10-11-3-6-7; 与1/3 降压式谐振开关电容变换器类似,由串联谐振的规律,单个开关电容不能通过5-1-0与 L_r 、 U_s 反向串联谐振,由此可设置预处理条件为5-1-0。正常工作路径共有5条,其中开关电容串联充电的路

径为0-1-5-6-7-8-9-10-11-3-2-4; 开关电容并联放电的路径为1-2-4-3-6-5、1-2-4-3-8-7-5、1-2-4-3-10-9-5和1-2-4-3-11-5。将这些条件按照软件提示输入后,可得1/5 降压式谐振开关电容变换器中存在6条潜在电路:1-2-4-3-6-7-5、1-2-4-3-8-9-5、1-2-4-3-10-11-5、5-6-7-8-9-10-11-3-2-1、6-7-5、3-10-11。具体的电路路径可由图2得到。

从上述例子可见,本软件分析的结果与文献[14]采用手工分析的结果完全一样,证实了本软件的正确性。但手工分析的方法周期长、易出现错漏,而本软件在已知预处理条件和正常工作路径的情况下,只需几分钟(包含电路信息的输入时间)即可得到潜在电路的分析结果,而且在处理节点较多的变换器(如 $n>3$)时,本软件的优势将更加明显。

由于其分析周期短、准确性高、通用性强,因此可满足在研究过程中需频繁进行潜在电路分析的需要,它有效克服了手工分析的方法耗时长、分析结果易受人为因素影响的缺陷。

6 结论

本文提出了潜在电路计算机辅助分析方法,在此基础上设计了适用于电力电子系统的潜在电路分析软件,并利用其对1/3及1/5 降压式谐振开关电容变换器进行了潜在电路分析,运行结果验证了潜在电路计算机分析方法的可行性。本文的研究成果可推广到其它电力电子电路的潜在电路分析中去,不论电路结构多么复杂,只需要输入电路的邻接矩阵模型和相应的判断条件,即可快速得到电路中的潜在电路路径,从而克服了采用手动分析中分析周期长、耗费人工且易出现人为错误的缺点,使电力电子系统的潜在电路分析研究变得更快捷、更准确。

参考文献

- [1] Price C J, Hughes N. Effective automated sneak circuit analysis [C]. Proceedings of Reliability and Maintainability Symposium, Seattle, Washington, USA, 2002.
- [2] 严启殿. 潜通路分析技术[J]. 导弹与航天运载技术, 2000, (1): 43-47.
Yan Qidian. Sneak path analysis technology[J]. Missile and Space Vehicles, 2000, (1): 43-47(in Chinese).
- [3] 孟雪松. 潜藏电路分析[J]. 航空标准化与质量, 1996, (5): 22-26.
Meng Xuesong. Sneak circuit analysis[J]. Aeronautics Standardization & Quality, 1996, (5): 22-26(in Chinese).
- [4] Rankin J P. Sneak circuit analysis[J]. Nuclear Safety, 1973, 14(5):

- 461-468.
- [5] 杨双进. 软件潜在电路分析及其应用[J]. 航空控制, 1996, 14(2): 63-71.
Yang Shuangjin. Software sneak analysis and its application [J]. Aerospace Control, 1996, 14(2): 63-71(in Chinese).
- [6] 任立明. 潜在电路分析软件 CapFast/SCAT 研究与开发: 潜电路分析技术之三[J]. 质量与可靠性, 1998, (4): 28-32.
Ren Liming. The research and development of sneak circuit analysis software CapFast/SCAT: sneak circuit analysis(Part III)[J]. Quality & Reliability, 1998, (4): 28-32(in Chinese).
- [7] 任立明. 潜在电路分析的历史、现状与发展: 潜电路分析技术之二[J]. 质量与可靠性, 1998, (3): 29-34.
Ren Liming. The history actuality and development of sneak circuit analysis(Part II)[J]. Quality & Reliability, 1998, (3): 29-34(in Chinese).
- [8] 任立明, 严殿启, 王汝龙. 潜在电路分析技术及在航天控制领域中的应用[J]. 航天控制, 1998, 16(1): 56-61.
Ren Liming, Yan Dianqi, Wang Rulong. Sneak circuit analysis and its applications in astronautic systems[J]. Aerospace Control, 1998, 16(1): 56-61(in Chinese).
- [9] 李学锋, 钱玲. 航天控制系统潜在分析技术应用研究[J]. 航天控制, 2000, 18(1): 26-30.
Li Xuefeng, Qian Ling. Applying research of sneak analysis technique in the aerospace control system[J]. Aerospace Control, 2000, 18(1): 26-30(in Chinese).
- [10] 游彦雯, 谭国斌, 袁振川. 潜电路分析法在某弹头系统故障排除中的应用[J]. 导弹试验技术, 2000, (1): 10-12.
You Yanwen, Tan Guobin, Yuan Zhenchuan. The applications of sneak circuit analysis in eliminating a failure in warhead system [J]. Missile Testing Technology, 2000, (1): 10-12(in Chinese).
- [11] 马皓, 张志学. 电力电子变化器主电路拓扑辨识型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 55-60.
Ma Hao, Zhang Zhixue. Topology identification for power electronic circuits[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 55-60(in Chinese).
- [12] 张志学, 马皓, 毛兴云. 基于混杂系统模型和事件识别的电力电子电路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 49-53.
Zhang Zhixue, Ma Hao, Mao Xingyun. Fault diagnosis for power electronics circuits based on hybrid system theory and event identification[J]. Missile Testing Technology, 2005, 25(3): 49-53(in Chinese).
- [13] 丘东元, 张波. 谐振开关电容变换器中潜电路现象的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 34-40.
Qiu Dongyuan, Zhang Bo. Study of sneak circuit in resonant switched capacitor converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 34-40(in Chinese).
- [14] 黎剑源, 丘东元, 张波. n 阶谐振开关电容变换器潜电路图论分析法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 53-59.
Li Jianyuan, Qiu Dongyuan, Zhang Bo. Graph theory analysis method for sneak circuit in n -stage resonant switched capacitor converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(3): 53-59(in Chinese).
- [15] Tu Wenjuan, Qiu Dongyuan, Zhang Bo, et al. Sneak circuit analysis in n -stage resonant switched capacitor converters[C]. IEEE International Workshop on Anti-counterfeiting, Security, Identification, Xiamen, China, 2007.
- [16] 马齐爽, 唐瑶, 张平波. 模拟开关电路潜在电路分析软件算法的研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(5): 581-584.
Ma Qishuang, Tang Yao, Zhang Pingbo. Sneak circuit analysis algorithm research for analog switch circuit[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(5): 581-584(in Chinese).
- [17] 徐孝凯. 数据结构实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [18] Ma Qingliang, Hu Changhua, Hu Shuhai. Combining qualitative simulation with functional labels for automated sneak circuit analysis [C]. Proceeding of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation, Hefei, China, 2000.
- [19] 阮新波, 严仰光. 直流开关电源的软开关技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.



梅 义

收稿日期: 2007-09-20.

作者简介:

梅 义(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子系统与装置, meiyi925@163.com;

丘东元(1972—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子系统的拓扑技术, epdyqiu@scut.Edu.cn;

张 波(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子与交流传动, epbzhang@scut.edu.cn.

(编辑 谷 子)