

# 基于图论的 $n$ 阶升压式谐振开关电容变换器潜电路分析技术

涂文娟, 丘东元, 张 波, 黎剑源

(华南理工大学电力学院, 广东广州 510641)

**摘 要:** 高阶升压式谐振开关电容变换器的升压阶数增加, 拓扑变得更加复杂, 其潜在路径隐蔽性更强, 因而需要研究一种系统的分析方法. 为此本文基于图论提出一种  $n$  阶升压式谐振开关电容变换器潜电路分析方法, 文中给出了该图论分析法的原理和步骤, 并以 3 阶升压式谐振开关电容变换器为例进行了仿真和实验证明. 研究结果表明, 该方法简单易行, 是一种可供推广的电力电子变换器的潜电路分析方法, 为预先发现和消除高阶升压式谐振开关电容变换器中的安全隐患提供了理论依据.

**关键词:** 谐振开关电容变换器;  $n$  阶; 升压; 潜电路; 图论

**中图分类号:** TM 46, O157. 6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 02-0271-07

## Sneak Circuit Analysis in $n$ -Stage Step-up Resonant Switched Capacitor Converters Based on Graphic Theory

TU Wenjuan, QIU Dongyuan, ZHANG Bo, LI Jianyuan

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

**Abstract:** With the increasing number of switched capacitor cells, the topology of  $n$  stage step up resonant switched capacitor converter (RSC) is more complex, so it is hard to observe sneak circuit paths in the converter. In this paper, a general method is proposed to analyze the sneak circuit paths in  $n$  stage step up RSC converters based on graphic theory. The theorem and steps to obtain sneak paths were explained in detail, and the 3 stage step up RSC converter was taken as an example to describe how to find out the sneak circuit paths. The proposed sneak circuit analysis method, whose correctness is finally verified by simulation and experimental results, can be extended to other power electronics converters, and is useful for discovering, eliminating or utilizing sneak circuit paths.

**Key words:** resonant switched capacitor converter;  $n$  stage; step up; sneak circuit; graphic theory

### 1 引言

上个世纪 60 年代, 波音公司通过对许多重大故障与事故案例的研究, 发现有许多故障与事故并不是由于元器件失效引起的, 而是由于系统设计方案之中固有的状态引起的. 这些状态是设计者为了实现某些设计意图而无意带进设计方案中的. 因此, 系统存在着某些设计者未认识到的回路, 这些回路称为潜电路. 一旦某些条件满足, 这些潜在的路径就会形成回路, 产生非预期的功能, 或是抑制了预期的功能, 引起系统故障, 严重时还会造成事故, 包括设备损坏和人员伤亡<sup>[1~3]</sup>.

随着电力电子技术的发展, 以及在各个行业及人们

日常生活中的应用, 使得其系统的稳定性和安全性备受关注<sup>[4]</sup>. 如果系统中存在潜电路的话, 这些潜在的通路将对系统的稳定性和安全性构成一定的威胁. 本文作者在研究一类谐振开关电容变换器时, 发现在某些特定情况下, 变换器工作状态由原来的 4 个模态变为了 6 个模态, 出现了 2 个非预期的模态, 即出现了潜电路<sup>[5~7]</sup>. 潜电路的出现使得输出电压特性变差. 因此, 找出该类谐振开关电容变换器的潜在通路, 对预防潜电路的出现具有重要的意义.

对于最基本的 2 阶升压式谐振开关电容变换器, 基于一般电路原理很容易发现其潜电路路径<sup>[8~10]</sup>. 但高阶 (3 阶或 3 阶以上) 升压式谐振开关电容变换器的电

路复杂程度大大提高<sup>[11]</sup>, 文献[5~7]的潜电路研究方法已不适应高阶升压式谐振开关电容变换器潜电路的发现和研究的。为此, 本文将基于图论方法分析  $n$  阶升压式谐振开关电容变换器潜电路路径, 由此提出该类变换器潜电路图论分析的一般方法, 为预先发现和消除高阶升压式谐振开关电容变换器中的安全隐患提供理论依据。

## 2 $n$ 阶升压式谐振开关电容变换器

图1是  $n$  阶升压式谐振开关电容变换器, 它由主电路开关管  $S_1$ 、 $S_2$ 、电感  $L_r$  及负载  $R_L$  和  $n-1$  个基本升压单元串接而成<sup>[11]</sup>, 其中  $D_{s1}$ 、 $D_{s2}$  是开关管  $S_1$ 、 $S_2$  的寄生反向二极管。每个升压基本单元如图2所示, 由二极管  $D_{am}$ 、 $D_{bm}$ 、电容  $C_{am}$ 、开关电容  $C_{rm}$  构成, 其中  $m \in 1, 2, \dots, n-1$ 。

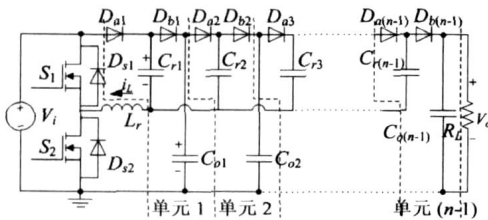


图1  $n$  阶升压式谐振开关电容变换器

根据  $n$  阶升压式谐振开关电容变换器构成原理, 3 阶升压式谐振开关电容变换器如图3所示, 它由2个升压基本单元串联而成, 按占空比相等控制  $S_1$  和  $S_2$  轮流导通, 变换器输出要求的电压。

3 阶升压式谐振开关电容变换器正常工作过程可分为四个模式<sup>[12]</sup>, 其对应的等效电路及电感电流 ( $i_L$ )、开关电容 ( $C_{r1}$ 、 $C_{r2}$ ) 电压波形如图4所示。

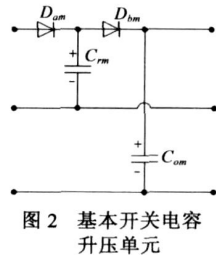


图2 基本开关电容升压单元

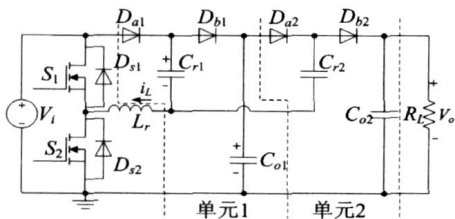


图3 3 阶升压式谐振开关电容变换器

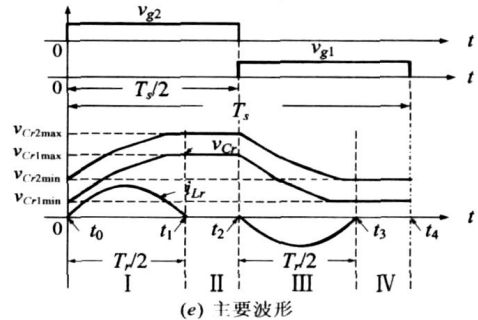
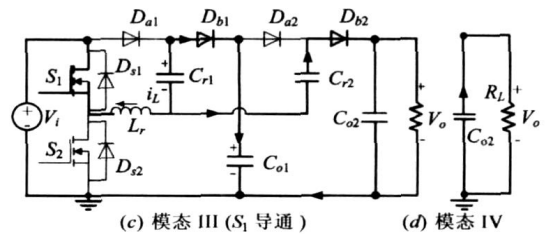
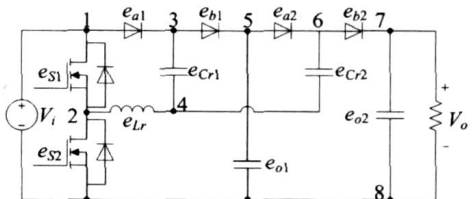


图4 正常工作下3阶升压式谐振开关电容变换器等效电路和波形 ( $f_r > f_s$ )

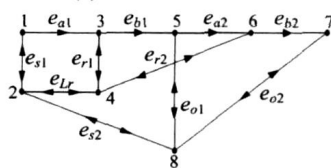
## 3 3 阶升压式谐振开关电容变换器图论分析法

### 3.1 有向图及连接矩阵

根据图论分析法<sup>[13~15]</sup>, 对3阶升压式谐振开关电容变换器每个元件所在的路径进行命名, 同时将电路中每条支路的交点用数字编号, 其中节点1代表电源正极, 节点8代表电源地, 如图5(a)所示。图5(b)为图5(a)简化后的有向图。图中的箭头表示电流可以流动的方向, 由电路元件的特性决定, 对于无源元件电阻、电感、电容及带反向二极管的开关元件, 电流可双向流动, 用双向箭头表示; 无反向二极管的开关元件、二极管电流只能单向流动, 用单向箭头表示。



(a) 节点与支路的表示图



(b) 简化后的有向图

图5 3 阶升压式谐振开关电容变换器的有向图

对应于有向图5(b)的连接矩阵  $C$  是一个  $8 \times 8$  阶矩阵, 矩阵的元素  $c_{ij}$  定义如下<sup>[14, 15]</sup>。

$$c_{i,j} = \begin{cases} 1, & i = j \text{ 时} \\ 0, & i \neq j, \text{ 且节点 } i \text{ 和 } j \text{ 之间没有边相连} \\ \sum_{k=1}^m e_k, & e_1, e_2, \dots, e_k \text{ 为从节点 } i \text{ 到 } j \text{ 的有向边} \end{cases} \quad (1)$$

根据连接矩阵定义, 由图 5(b) 可得 3 阶升压式谐振开关电容变换器的连接矩阵为

$$C_3 = \begin{bmatrix} 1 & e_{s1} & e_{a1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e_{s1} & 1 & 0 & e_{Lr} & 0 & 0 & 0 & e_{s2} \\ 0 & 0 & 1 & e_{b1} & e_{b1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_{Lr} & e_{r1} & 1 & 0 & e_{r2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & e_{a2} & 0 & e_{o1} \\ 0 & 0 & 0 & e_{r2} & 0 & 1 & e_{b2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & e_{o2} \\ 0 & e_{s2} & 0 & 0 & e_{o1} & 0 & e_{o2} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中  $C$  的下标 3 对应于 3 阶升压式谐振开关电容变换器, 以下同。

### 3.2 通路计算

定义  $\Delta_{ij}$  为连接矩阵  $C$  的余子式, 则  $\Delta_{ij}$  的行列式的各项因子表示从有向图  $G$  的节点  $j$  到节点  $i$  的通路<sup>[14, 15]</sup>. 且规定每条支路只能通过一次, 故在计算中忽略带平方项的通路, 并省略, 由此可得到任意两个节点间通路的开关函数  $F_{ij}$ .

**3.2.1 电源到地的通路** 图 5(b) 的电源(节点 1)到地(节点 8)之间的所有通路可由以下行列式得到. 因为

$$\Delta_{3-81} = \begin{vmatrix} e_{s1} & e_{a1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & e_{Lr} & 0 & 0 & 0 & e_{s2} \\ 0 & 1 & e_{r1} & e_{b1} & 0 & 0 & 0 \\ e_{Lr} & e_{r1} & 1 & 0 & e_{r2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & e_{a1} & 0 & e_{o1} \\ 0 & 0 & e_{r2} & 0 & 1 & e_{b2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & e_{o2} \end{vmatrix}$$

故

$$F_{3-81} = e_{a1}e_{r1}e_{Lr}e_{s2} + e_{s1}e_{Lr}e_{r1}e_{b1}e_{o1} + e_{s1}e_{Lr}e_{r2}e_{b2}e_{o2} + e_{s1}e_{s2} + e_{r2}e_{a2}e_{b1}e_{r1}e_{s2}e_{s1} + e_{a2}e_{b1}e_{a1}e_{o2}e_{b1} + e_{a2}e_{b1}e_{a1}e_{r2}e_{s2}e_{Lr} + e_{a2}e_{b1}e_{r1}e_{o2}e_{b2}e_{Lr}e_{s1} + e_{o1}e_{b1}e_{a1} + e_{o2}e_{r2}e_{b2}e_{r1}e_{a1} \quad (3)$$

其中下标 81 表示电源(节点 1)到地(节点 8)之间的所有通路, 从式(3)可见它们之间共有 10 条通路。

**3.2.2 地到电源的通路** 同理, 地(节点 8)到电源(节点 1)之间的通路由余子式

$$\Delta_{3-18} = \begin{vmatrix} e_{s1} & 1 & 0 & e_{Lr} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & e_{r1} & e_{b1} & 0 & 0 \\ 0 & e_{Lr} & e_{r1} & 1 & 0 & e_{r2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & e_{a1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{r2} & 0 & 1 & e_{b2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & e_{s2} & 0 & 0 & e_{o1} & 0 & e_{o2} \end{vmatrix}$$

得:

$$F_{3-18} = e_{o1}e_{a2}e_{r2}e_{Lr}e_{s1} + e_{r2}e_{a2}e_{b1}e_{s1}e_{s2} + e_{s1}e_{s2} \quad (4)$$

从式(4)可见它们共有 3 条通路, 由于是有向通路, 比式(3)少 7 条通路。

**3.2.3 回路计算** 计算  $C$  的行列式, 即计算矩阵(2)中行列式的值, 就可获得电路中所有的可能回路:

$$F_{|C_3|} = e_{o1}e_{a2}e_{r2}e_{Lr}e_{s2} + e_{Lr}e_{r1}e_{b1}e_{o1}e_{s2} + e_{Lr}e_{r2}e_{b2}e_{o2}e_{s2} + e_{Lr}e_{s1}e_{a1}e_{r1} + e_{a2}e_{b1}e_{a1}e_{s1}e_{o2}e_{b2}e_{s2} + e_{r2}e_{s2}e_{o2}e_{b2}e_{r1}e_{a1}e_{s1} + e_{s2}e_{o1}e_{b1}e_{a1} + e_{r2}e_{a2}e_{b1}e_{r1} + e_{Lr}e_{a2}e_{b1}e_{a1}e_{s1}e_{r2} + e_{a2}e_{o1}e_{Lr}e_{o2}e_{b2}e_{r1}e_{a1}e_{s1} + e_{a2}e_{o1}e_{o2}e_{b2} + e_{a2}e_{b1}e_{r1}e_{s2}e_{o2}e_{Lr}e_{b2} \quad (5)$$

从式(5)可见共有 12 条独立回路。

### 3.3 有效通路及正常工作通路的筛选

遵循以下基本原则, 由式(3)~(5)的计算结果可以决定电路中有效的通路。

(1) 根据电路原理,  $S_1$  和  $S_2$  是不可能同时导通的, 故把同时含有  $e_{s1}e_{s2}$  的通路除去。

(2) 按照升压式谐振开关电容变换器的工作原理,  $D_{a1}$ ,  $D_{b1}$ ,  $D_{a2}$ ,  $D_{b2}$  相邻的两个二极管不能同时导通, 且这四个二极管不能同时导通. 若  $D_{a1}$ ,  $D_{b1}$  同时导通, 会导致  $V_{o1} = V_i$ ; 若  $D_{b1}$ ,  $D_{a2}$  同时导通, 会导致  $V_{r1} = V_{r2}$ ; 若  $D_{a1}$ ,  $D_{b1}$ ,  $D_{a2}$ ,  $D_{b2}$  同时导通, 则会导致  $V_i = V_o$ , 上述情况与变换器的工作原理不符. 因此含有  $e_{a1}e_{b1}$ ,  $e_{b1}e_{a2}$ ,  $e_{a2}e_{b2}$  及  $e_{a1}e_{b1}e_{a2}e_{b2}$  的支路应剔除。

(3) 在式(3)中出现的  $e_{o2}e_{r2}e_{b2}e_{r1}e_{a1}$  通路意味着  $C_{r1}$ ,  $C_{r2}$  串联, 与变换器的工作原理不符, 应剔除。

据以上分析, 参考 3 阶降压式谐振开关电容变换器的工作原理, 工作模式可能由基本通路  $e_{a1}e_{r1}e_{Lr}e_{s2}$ ,  $e_{o1}e_{a2}e_{r2}e_{Lr}e_{s2}$ ,  $e_{s1}e_{Lr}e_{r1}e_{b1}e_{o1}$ ,  $e_{s1}e_{Lr}e_{r2}e_{b2}e_{o2}$ ,  $e_{Lr}e_{r1}e_{b1}e_{o1}e_{s2}$ ,  $e_{Lr}e_{r2}e_{b2}e_{o2}e_{s2}$ ,  $e_{Lr}e_{s1}e_{a1}e_{r1}$ ,  $e_{o1}e_{a2}e_{r2}e_{Lr}e_{s1}$  构成, 有效路径可表述如下:

$$F_3 = e_{a1}e_{r1}e_{Lr}e_{s2} + e_{o1}e_{a2}e_{r2}e_{Lr}e_{s2} + e_{s1}e_{Lr}e_{r1}e_{b1}e_{o1} + e_{s1}e_{Lr}e_{r2}e_{b2}e_{o2} + e_{Lr}e_{r1}e_{b1}e_{o1}e_{s2} + e_{Lr}e_{r2}e_{b2}e_{o2}e_{s2} + e_{Lr}e_{s1}e_{a1}e_{r1} + e_{o1}e_{a2}e_{r2}e_{Lr}e_{s1} \quad (6)$$

显然对应于图 4, 构成 3 阶升压式谐振开关电容变换器的正常工作的基本通路和潜在基本通路如表 1, 正常模式构成规律见表 2。

表 1 3 阶升压式谐振开关电容变换器  
正常通路和潜在通路基本通路

正常模式基本通路	潜在模式基本通路
$e_{a1}e_{r1}e_{Lr}e_{s2}$	$e_{Lr}e_{r1}e_{b1}e_{o1}e_{s2}$
$e_{o1}e_{a2}e_{r2}e_{Lr}e_{s2}$	$e_{Lr}e_{r2}e_{b2}e_{o2}e_{s2}$
$e_{s1}e_{Lr}e_{r1}e_{b1}e_{o1}$	$e_{Lr}e_{s1}e_{a1}e_{r1}$
$e_{s1}e_{Lr}e_{r2}e_{b2}e_{o2}$	$e_{o1}e_{a2}e_{r2}e_{Lr}e_{s1}$

表 2 3 阶升压式谐振开关电容变换器正常工作模式

模式	基本通路组合
I	$e_{a1}e_{r1}e_{Lr}e_{s2}, e_{o1}e_{a2}e_{r2}e_{Lr}e_{s2}, e_{o2}$
II	$e_{o2}$
III	$e_{s1}e_{Lr}e_{r1}e_{b1}e_{o1}, e_{s1}e_{Lr}e_{r2}e_{b2}e_{o2}$
IV	$e_{o2}$

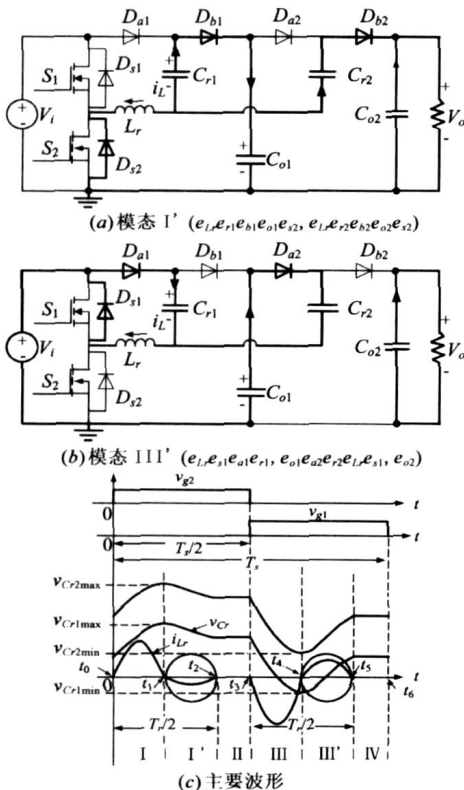
### 3.4 潜电路工作情况

由表 1 的潜在模式基本通路, 对照图 4, 可以得到 3 阶升压式谐振开关电容变换器两个潜电路模式. 由于它们仅能出现在原正常模式 I 和 III 后, 故潜在通路所在的模式被分别称为模式 I' 和 III', 其等效电路如图 6 所示. 此时, 3 阶升压式谐振开关电容变换器的工作模式由 4 个增加为 6 个, 见表 3.

表 3 3 阶升压式谐振开关电容变换器潜电路工作模式

模式	基本通路组合
I	$e_{a1}e_{r1}e_{Lr}e_{s2}, e_{o1}e_{a2}e_{r2}e_{Lr}e_{s2}, e_{o2}$
I'	$e_{Lr}e_{r1}e_{b1}e_{o1}e_{s2}, e_{Lr}e_{r2}e_{b2}e_{o2}e_{s2}$
II	$e_{o2}$
III	$e_{s1}e_{Lr}e_{r1}e_{b1}e_{o1}, e_{s1}e_{Lr}e_{r2}e_{b2}e_{o2}, e_{o2}$
III'	$e_{Lr}e_{s1}e_{a1}e_{r1}, e_{o1}e_{a2}e_{r2}e_{Lr}e_{s1}, e_{o2}$
IV	$e_{o2}$

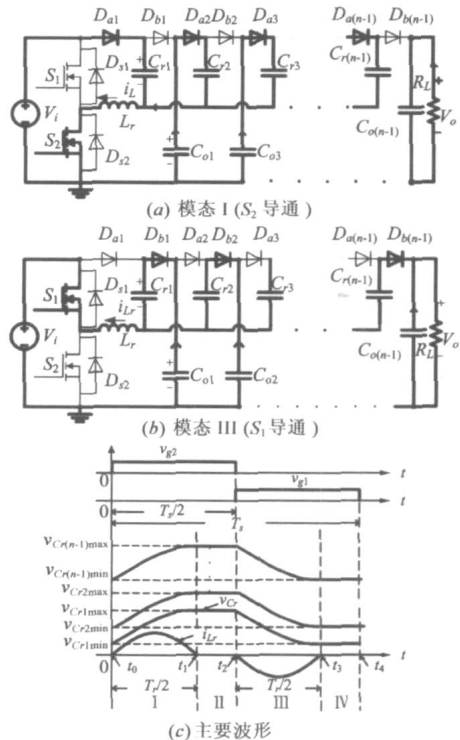
由表 2 和表 3 可见, 模式 I 结束后, 电感电流并没有如正常情况下在  $t_1$  时刻停止谐振, 而是通过  $C_{r1}$ 、

图 6 潜电路出现时 3 阶升压式谐振开关电容变换器的波形和等效电路 ( $f_r > 2f_s$ )

$D_{b1}$ 、 $C_{o1}$ 、 $D_{s2}$ 、 $L_r$  和  $C_{r2}$ 、 $D_{b2}$ 、 $C_{o2}$ 、 $D_{s2}$ 、 $L_r$  两条通路继续反向谐振, 即出现模式 I'. 当  $f_r > 2f_s$  时, 变换器的谐振单元在每个开关导通期间可以完成一个周期的谐振. 如图 6(c) 所示, 电感电流反向谐振半个周期, 直到  $t_2$  时刻, 电感电流再次回到 0, 该阶段结束. 模式 III 结束后, 跟模式 I 相似, 电感电流出现反向谐振, 通过  $C_{r1}$ 、 $L_r$ 、 $D_{s1}$ 、 $D_{a1}$  和  $C_{o1}$ 、 $D_{a2}$ 、 $C_{r2}$ 、 $L_r$ 、 $D_{s1}$ 、 $V_i$  等 2 条通路继续谐振, 从而出现模式 III'.

### 4 n 阶升压式谐振开关电容变换器

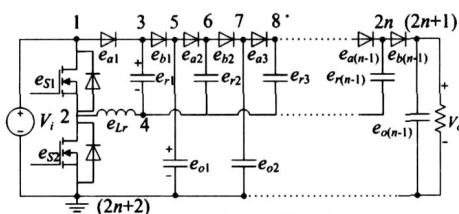
$n$  阶升压式谐振开关电容变换器正常工作过程与 3 阶升压式谐振开关电容变换器工作过程类似, 其工作过程可也分为四个模式, 其对应的等效电路及电感电流 ( $i_L$ )、开关电容 ( $C_{r1}$ 、 $C_{r2}$ 、 $\dots$ 、 $C_{r(n-1)}$ ) 电压波形如图 7 所示.

图 7 正常情况下  $n$  阶升压式谐振开关电容变换器等效电路和波形 ( $f_r > f_s$ )

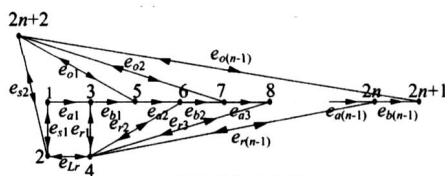
下面将基于图论的 3 阶升压式谐振开关电容变换器潜电路路径分析方法应用于  $n$  阶升压式谐振开关电容变换器, 进行潜电路分析.

如图 8(a) 所示, 对  $n$  阶升压式谐振开关电容变换器每个元件所在的路径进行命名, 其次将电路中每条支路的交点用数字编号, 其中节点 1 代表电源正极, 节点  $(2n+2)$  代表电源地.

根据连接矩阵定义, 由图 8(b) 可得  $n$  阶升压式谐振开关电容变换器的连接矩阵  $C_n$  是一个  $(2n+2) \times (2n+2)$  的矩阵:



(a) 节点与支路的示意图



(b) 简化后的有向图

图 8  $n$  阶升压式谐振开关电容变换器的有向图

$$C_n = \begin{bmatrix} 1 & e_{s1} & e_{a1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e_{s1} & 1 & 0 & e_L & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & e_{s2} \\ 0 & 0 & 1 & e_{r1} & e_{b1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_L & e_{r1} & 1 & 0 & e_{r2} & 0 & \dots & e_{rm} & 0 & e_{r(m+1)} & 0 & \dots & 0 & e_{r(n-1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & e_{a2} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & e_{o1} \\ 0 & 0 & 0 & e_{r2} & 0 & 1 & e_{b2} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & e_{o2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & e_m & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & e_{lm} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & e_{a(m+1)} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & e_m \\ 0 & 0 & 0 & e_{r(m+1)} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & e_{b(m+1)} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & e_{o(m+1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & e_{a(n-1)} & 0 & e_{o(n-2)} \\ 0 & 0 & 0 & e_{r(n-1)} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & e_{o(n-1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & e_{o(n-1)} \\ 0 & e_{s2} & 0 & 0 & e_{o1} & 0 & e_{o2} & \dots & 0 & e_{om} & 0 & e_{o(m+1)} & \dots & e_{o(n-2)} & 0 & e_{o(n-1)} & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据图论分析法, 计算开关函数  $F_{n-(2n+2)1}$ 、 $F_{n-1(2n+2)}$  及  $F_{1C_n}$  的值就可以得出  $n$  阶升压式谐振开关电容变换器中所有可能的通路。采用类似 3.3 节中的有效通路的筛选方法, 剔除无效通路后, 得到的有效通路结果如下:

$$F_{n-(2n+2)1} = e_{a1}e_{r1}e_{Lr}e_{s2} + \{e_{s1}e_{Lr}e_{r1}e_{b1}e_{o1} + \dots + e_{s1}e_{Lr}e_{rm}e_{lm}e_{am} + \dots + e_{s1}e_{Lr}e_{r(n-1)}e_{b(n-1)}e_{o(n-1)}\} \quad (8)$$

$$F_{n-1(2n+2)} = e_{o1}e_{a2}e_{r2}e_{Lr}e_{s1} + \dots + e_{am}e_{a(m+1)}e_{r(m+1)}e_{Lr}e_{s1} + \dots + e_{o(n-2)}e_{a(n-1)}e_{r(n-1)}e_{Lr}e_{s1} \quad (9)$$

$$F_{1C_n} = \{e_{o1}e_{a2}e_{r2}e_{Lr}e_{s1} + \dots + e_{am}e_{a(m+1)}e_{r(m+1)}e_{Lr}e_{s2} + \dots + e_{o(n-2)}e_{a(n-1)}e_{r(n-1)}e_{Lr}e_{s2}\} + \{e_{Lr}e_{r1}e_{b1}e_{o1}e_{s2} + \dots + e_{Lr}e_{rm}e_{bm}e_{am}e_{s2} + \dots + e_{Lr}e_{r(n-1)}e_{b(n-1)}e_{o(n-1)}e_{s2}\} + e_{Lr}e_{s1}e_{a1}e_{r1} \quad (10)$$

根据式(8)~(10), 并参考文献[7]中  $n$  阶升压式谐振开关电容变换器的正常工作过程, 可知正常的工作模式由基本通路  $e_{a1}e_{r1}e_{Lr}e_{s2}$ ,  $e_{o1}e_{a2}e_{r2}e_{Lr}e_{s2}$ ,  $\dots$ ,  $e_{o(n-2)}e_{a(n-1)}e_{r(n-1)}e_{Lr}e_{s2}$  以及  $e_{s1}e_{Lr}e_{r1}e_{b1}e_{o1}$ ,  $\dots$ ,  $e_{s1}e_{Lr}e_{r(n-1)}e_{b(n-1)}e_{o(n-1)}$  构成, 而基本通路  $e_{Lr}e_{r1}e_{b1}e_{o1}e_{s2}$ ,  $\dots$ ,  $e_{Lr}e_{r(n-1)}e_{b(n-1)}e_{o(n-1)}e_{s2}$  以及  $e_{Lr}e_{s1}e_{a1}e_{r1}$ ,  $e_{o1}e_{a2}e_{r2}e_{Lr}e_{s1}$ ,  $\dots$

$e_{o(n-2)}e_{a(n-1)}e_{r(n-1)}e_{Lr}e_{s1}$  则构成可能出现的潜在模式。

表 4  $n$  阶升压式谐振开关电容变换器正常工作模式

模式	基本通路组合
I	$e_{a1}e_{r1}e_{Lr}e_{s2}$ , $e_{o1}e_{a2}e_{r2}e_{Lr}e_{s2}$ , $\dots$ , $e_{o(n-2)}e_{a(n-1)}e_{r(n-1)}e_{Lr}e_{s2}$ , $e_{o(n-1)}$
II	$e_{o(n-1)}$
III	$e_{s1}e_{Lr}e_{r1}e_{b1}e_{o1}$ , $\dots$ , $e_{s1}e_{Lr}e_{r(n-1)}e_{b(n-1)}e_{o(n-1)}$
IV	$e_{o(n-1)}$

表 5  $n$  阶升压式谐振开关电容变换器潜电路工作模式

模式	基本通路组合
I	$e_{a1}e_{r1}e_{Lr}e_{s2}$ , $e_{o1}e_{a2}e_{r2}e_{Lr}e_{s2}$ , $\dots$ , $e_{o(n-2)}e_{a(n-1)}e_{r(n-1)}e_{Lr}e_{s2}$ , $e_{o(n-1)}$
I'	$e_{Lr}e_{r1}e_{b1}e_{o1}e_{s2}$ , $\dots$ , $e_{Lr}e_{r(n-1)}e_{b(n-1)}e_{o(n-1)}e_{s2}$
II	$e_{o(n-1)}$
III	$e_{s1}e_{Lr}e_{r1}e_{b1}e_{o1}$ , $\dots$ , $e_{s1}e_{Lr}e_{r(n-1)}e_{b(n-1)}e_{o(n-1)}$
III'	$e_{Lr}e_{s1}e_{a1}e_{r1}$ , $e_{o1}e_{a2}e_{r2}e_{Lr}e_{s1}$ , $\dots$ , $e_{o(n-2)}e_{a(n-1)}e_{r(n-1)}e_{Lr}e_{s1}$ , $e_{o(n-1)}$
IV	$e_{o(n-1)}$

由表 4 和表 5 可见, 类似 3 阶升压式谐振开关电容变换器的分析发现, 模式 I 结束后, 电感电流并没有如正常情况下在  $t_1$  时刻停止谐振, 而是通过  $C_{r1}$ 、 $D_{b1}$ 、 $C_{o1}$ 、 $D_{s2}$ 、 $L_r$ ;  $C_{r2}$ 、 $D_{b2}$ 、 $C_{o2}$ 、 $D_{s2}$ 、 $L_r$ ;  $\dots$ ;  $C_{r(n-2)}$ 、 $D_{b(n-2)}$ 、 $C_{o(n-2)}$ 、 $D_{s2}$ 、 $L_r$ ;  $C_{r(n-1)}$ 、 $D_{b(n-1)}$ 、 $C_{o(n-1)}$ 、 $D_{s2}$ 、 $L_r$  等  $n-1$  条通路继续反向谐振, 由此出现模式 I'。

模式 III 结束后,跟模式 I 相似,电感电流通过  $D_{a1}$ 、 $C_{r1}$ 、 $L_r$ 、 $D_{s1}$ ;  $C_{o1}$ 、 $D_{a2}$ 、 $C_{r2}$ 、 $L_r$ 、 $D_{s1}$ 、 $V_i$ ;  $\dots$ ;  $C_{o(n-2)}$ 、 $D_{a(n-1)}$ 、 $C_{r(n-1)}$ 、 $L_r$ 、 $D_{s1}$ 、 $V_i$  等  $n-1$  条通路继续谐振,由此出现模式 III'.

对应的  $n$  阶升压式谐振开关电容变换器的等效电路和主要波形如图 9 所示,验证了计算结果.

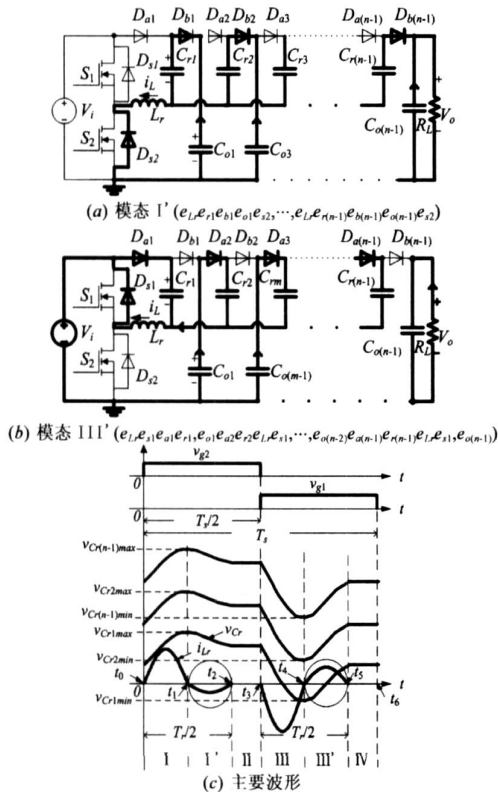


图 9 潜电路出现时  $n$  阶升压式谐振开关电容变换器的波形和等效潜电路 ( $f_r > 2f_s$ )

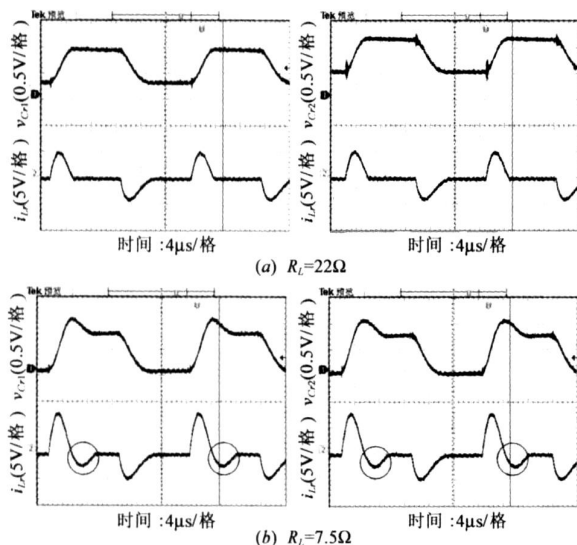


图 10 在不同负载下 3 阶升压式谐振电容开关变换器的实验波形

## 5 实验结果

基于图 3 本文制作了一台 3 阶升压式谐振开关电容变换器样机. 开关管选用 POWER MOSFET IRFZ44N, 快恢复二极管选用肖特基二极管 S30SC4M. 电路中各项参数为  $L_r = 320\text{nH}$ ,  $C_{r1} = C_{r2} = 2\text{pF}$ ,  $C_{o2} = 330\text{pF}$ ,  $f_r = 140\text{kHz}$ ,  $f_s = 42\text{kHz}$ ,  $V_i = 3\text{V}$ . 改变负载电阻, 得到不同负载下开关电容电压、电感电流的波形. 样机的正常工作波形如图 10(a) 所示, 继续减小负载电阻, 得到的实验结果如图 10(b) 所示, 出现了上述分析的潜电路现象. 图 10(b) 中画圈标注出波形部分由潜电路产生, 实验结果与理论分析结果相一致. 需要说明的是, 由于输入电源不是理想电源, 含有一定内阻; 二极管  $D_{a1}$ 、 $D_{b1}$ 、 $D_{a2}$ 、 $D_{b2}$  导通时存在一定压降, 导致实验波形与理想波形有一些差异, 但基本工作状态与上面分析一致.

## 6 结论

本文首先对 3 阶升压式谐振开关电容变换器进行图论分析, 得到其潜在的路径, 并将该方法推广到  $n$  阶升压式谐振开关电容变换器. 由此得到  $n$  阶升压式谐振开关电容变换器的潜电路路径一般分析方法. 最后, 本文通过实验验证, 证明理论分析结果的正确性, 从而为发现该类升压式谐振开关电容变换器的潜电路路径提供理论依据.

## 参考文献:

- [1] Ma Qingliang, Hu Changhua, Hu Shuhai. Combining qualitative simulation with functional labels for automated Sneak circuit analysis[A]. The 3rd IEEE world Congress on Intelligent Control and Automation[C]. Hefei, 2000.
- [2] 孟雪松. 潜在电路分析[J]. 航空标准化与质量, 1996(5): 22-26.  
Meng Xuesong. Sneak circuit analysis[J]. Aeronautic standardization & quality, 1996(5): 22-26. (in Chinese)
- [3] Rankin John P. Sneak circuit analysis[J]. Nuclear Safety, 1973, 14(5): 461-468.
- [4] 张波. 电力电子学亟待解决的若干基础问题探讨[J]. 电工技术学报, 2006, 21(3): 24-35.  
Zhang Bo. Discussion on several fundamental problems necessary to be solved in power electronics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(3): 24-35. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 丘东元, 涂文娟, 张波, 黎剑源. 谐振开关电容变换器的潜

电路特性[J]. 电子学报, 2007, 35(8): 1503–1510.

Qiu Dongyuan, Tu Wenjuan, Zhang Bo, Li Jianyuan. Sneak circuit characteristic of resonant switched capacitor converter[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(8): 1503–1510. (in Chinese)

- [7] Qiu Dongyuan, Zhang Bo. Discovery of sneak circuit phenomena in resonant switched capacitor DC-DC converters[A]. The 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications [C]. Singapore, 2006.

- [8] 刘健, 陈治明. 推挽开关电容 DC-DC 升压变换器[J]. 电工电能新技术, 1998, (1): 41–45.

Liu Jian, Chen Zhiming. Push pull switched step up DC-DC converter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1998, (1): 41–45. (in Chinese)

- [9] Yi-Cheng Lin, Der-Cheng Liaw. Parametric study of a resonant switched capacitor DC-DC converter[A]. Proceedings of IEEE Region 10 International Conference on Electrical and Electronic Technology[C]. TENCON, 2001.

- [10] K W E Cheng. New generation of switched capacitor converters[A]. in Proc IEEE PESC[C]. 1998. 1529–1535.

- [11] Law K K, Cheng K W E, Yeung Y P B. Design and analysis of switched capacitor based step up resonant converters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I, 2005, 52(5): 943–948.

- [12] K W E Cheng. Zero current switching switched capacitor converters[J]. IEE Proc - Electr Power Appl, 2001, 148, (5): 403–409.

- [13] 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)

- [14] 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.

- [15] 卜月华. 图论及其应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2002.

#### 作者简介:



涂文娟 女, 硕士研究生, 1983 年 8 月生于江西南昌, 2005 年 7 月毕业于南昌大学, 现就读于华南理工大学电力学院. 研究方向为电力电子软开关技术. E-mail: janetutu0810@126.com



丘东元 女, 博士, 副教授, 2002 年获得香港城市大学博士学位, 2003 年起在华南理工大学电力学院任教. 研究方向为电力电子系统的拓扑结构与控制方法. E-mail: epdyqiu@scut.edu.cn

张波 男, 教授, 博士生导师. 研究方向为电力电子与交流传动系统的非线性分析和控制.

黎剑源 男, 硕士研究生. 研究方向为电力电子拓扑.