

# 一种谐振软切换方案的能量分析研究

何 伟, 张福生, 牛影赞, 罗 帅

(石家庄铁道大学 电气与工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:**设计一种新型的并联谐振软开关拓扑结构,介绍了谐振软切换的工作原理,建立能量补充模型。得出开关管要想周期性地过零,实现软开关,必须补充回路中的损失以维持振荡的结论。合理设计导通开关管,为储能元件补充能量,使振荡得以维持,可为逆变桥创造出零电压间隔,从而实现软开关切换。

**关键词:**软开关;能量;谐振;软切换

**中图分类号:** TM743 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2020)01-0099-05

## 0 引言

近年来,随着软开关技术的蓬勃发展,电力电子设备逐渐实现小型化,高频化<sup>[1]</sup>。为了使软开关技术达到新高度,国内外学者对其进行深入研究。其中,有关谐振软切换技术的研究是人们特别关注的问题之一,相继展开一系列研究并取得一定的进展。目前研究者对这类问题的研究大多采用传统的电路分析方法,如文献[2]和文献[3]中提及的谐振软开关电路工作模式,它的局限在于缺乏对电路整体性的分析,而且对电路中能量的转换过程没有涉及。针对这一情况,本文建立相关的数学模型,采用能量补充的方法,通过导通各开关管为电感和电容进行充电,从而维持振荡,可使开关管周期性地过零,实现开关管的软切换。根据电路结构介绍了环流的产生以及抑制环流的主要方法,以使电路的设计能最大化的实现软切换。采用的新型研究方法拓宽了对谐振软切换技术提供的研究手段,提高了这一技术的研究水平,为后续研究者提供一种新思路。

## 1 谐振型软开关逆变电路

谐振软开关逆变电路根据电感电容不同组合方式可分为串联谐振电路和并联谐振电路,本文拓扑结构采用并联接法,如图 1 所示。

逆变电路结构由直流电压源,  $S_1 \sim S_4$  4 个功率开关管(选用 IGBT)构成全桥逆变网络,  $D_1 \sim D_4$  4 个快恢复二极管,并联电感电容组成,该接法限流能力强,而且短路保护可靠性高。当电路正常工作时,需要设计开关顺序使开关管互补导通,驱动电路负责产生 2 组相反的驱动信号。  $S_1$  和  $S_4$  为一组,  $S_2$  和  $S_3$  为另一组。电路中,当  $S_1$  和  $S_4$  导通时,  $S_2$  和  $S_3$  截止, 2 组不能同时导通,要留有一定的死区时间。

直流电源加在 2 组互补导通的开关管上,将直流电逆变成方波交流电,  $AB$  两端产生的正负交替的交流电经过并联  $LC$  谐振网络输出平滑的正弦波形。电感和电容中的能量在交换过程中会出现零点,此时切换开关将会实现 ZVS。

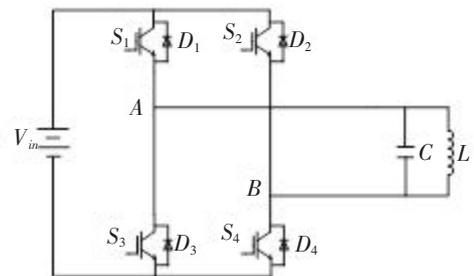


图 1 并联谐振型逆变电路

收稿日期:2018-05-15 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20180515002

作者简介:何伟(1994—),男,硕士研究生,研究方向为电力电子软开关。E-mail:649200218@qq.com

何伟,张福生,牛影赞,等.一种谐振软切换方案的能量分析研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(1):99-103.

## 2 能量补充模型

考虑到实际电路中电阻的存在且品质因数  $Q$  值为一有限值,使得逆变桥两端电压  $v_{AB}$  振荡为一衰减过程,并且最终稳定在零值。也就是说,此时  $v_{AB}$  不能产生周期性的过零点,不能为软切换及时提供条件<sup>[4]</sup>。如图 2 所示,实线曲线反映谐振时电压  $u$  随时间  $t$  变化关系。

实际电路中,电阻是主要的耗能元件,将电源的有功功率(电能)转化为热能形式消耗掉<sup>[5]</sup>。而电感和电容是储能元件,电容中存储着电场能,电感中存储着磁场能,当电路受到激励时会产生振荡,并且逐渐衰减。这时电磁能与电场能相互转化,彼此交换能量,即电路总能量守恒。在谐振状态下稳定地存储在电路中的能量  $W_s = 0.5CU^2$ ,这个能量是在电路接通后由外电路提供的,此后会在短时间内产生振荡而消耗。只要外电路不断地提供有功功率,这个振荡过程就可以保持近似等幅变化。而在谐振状态下不再需要外部提供电能,因此,为了使电路能够工作在谐振状态下,人们提出能量补充电路。图 3 给出一种能量补充电路的拓扑结构。

由上面的分析可知一个网络在有剩余能量的时候,它会在其自然频率点上做自由振荡,而且幅值会逐渐减小,直至为零。图 4、图 5 给出含有负载损耗时电路中电感和电容能量转化过程衰减变化曲线。如图 4 为三维变化曲线,图 5 为相轨迹曲线。

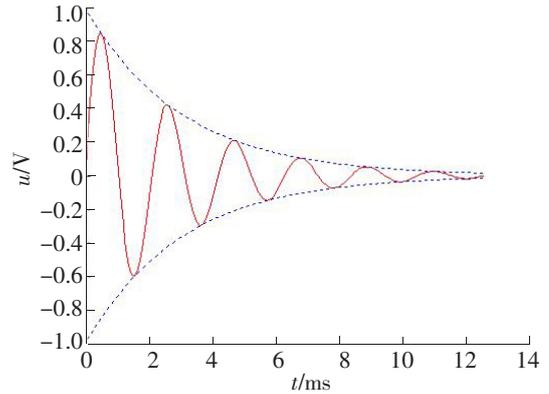


图 2 电压随振荡衰减波形

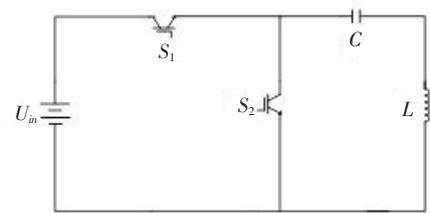


图 3 能量补充电路模型

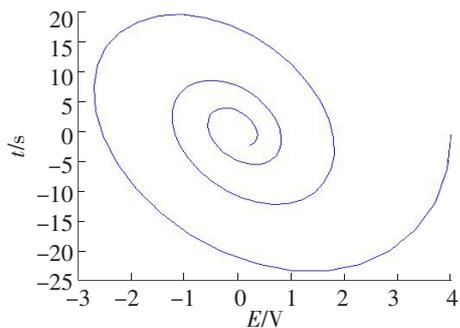


图 4 能量变化三维图

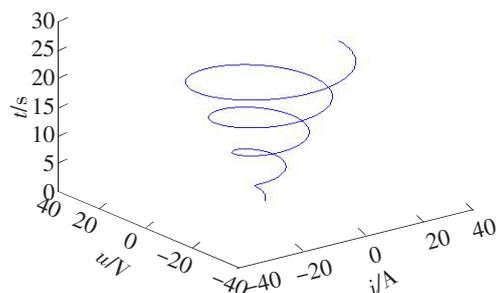


图 5 能量变化相轨迹曲线

图 3 给出了一种能量补充电路的拓扑结构图。该电路工作模态为:  
模态 1:  $S_2$  导通,  $S_1$  关断; 模态 2:  $S_1$  导通,  $S_2$  关断。

当运行在模态 1 时,电容  $C$ ,电感  $L$ ,开关管  $S_2$  构成一回路,由于储能原件  $L$ 、 $C$  的存在使电路在初始能量下做减幅振荡,振荡频率由  $L$  和  $C$  共同决定,直到能量消耗完毕。当运行在模态 2 时,电容  $C$ ,电感  $L$ ,开关管  $S_1$ ,电源  $U_{in}$  构成一回路(电流方向规定为电源正级流出为正方向)。此时,直流源的接入为谐振网络注入能量,从而弥补状态 1 中损失的能量。理论上完成一周期的能量补充。该设计如图 6 所示。图中上方表示初始能量衰减振荡过程,下方表示能量补充过程。

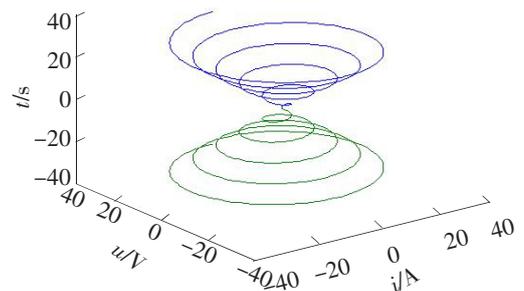


图 6 能量补充电路

### 3 电路模型与能量分析

在模型建立之前假设：电容  $C$  为理想元件，不存在寄生成分；开关管均为理想器件，开合是瞬间完成的。本文仅研究正方向运行情况，该并联谐振电路等效电路模型如图 7 所示。图中  $r$  为谐振回路的等效电阻， $C$  与  $L$  分别表示谐振电容和谐振电感，由基尔

霍夫定律列写电路的 KVL 及 KCL 方程如下

$$L_p \frac{di_1}{dt} = V_p - i_1 r_1 \quad (1)$$

$$C_p \frac{dV_p}{dt} = i_d - i_1 \quad (2)$$

求得电容两端电压  $V_p$  的表达式

$$L_p C_p \frac{d^2 V_p}{dt^2} + r_1 C_p \frac{dV_p}{dt} + V_p = i_d(0) r_1 \quad (3)$$

式中， $i_d(0)$  为初始电流值。在其他条件不变的情况下，可得  $V_p$  的表达式

$$V_p(t) = \frac{i_d(0) r_1}{\sin \theta} e^{-\frac{t}{T}} \sin(\omega_f t - \theta) + i_d(0) r_1 \quad (4)$$

此时，初始相角  $\theta$  为

$$\theta = \arctan \frac{\omega_f r_1 C_p}{1 - r_1 C_p / T} \quad (5)$$

计算出

$$\sin \theta = \frac{\omega_f r_1 C_p}{\sqrt{(\omega_f r_1 C_p)^2 + (1 - r_1 C_p / T)^2}} \quad (6)$$

带入式(3)，得出

$$V_p = \frac{i_d(0) \sqrt{(\omega_f r_1 C_p)^2 + (1 - r_1 C_p / T)^2}}{\omega_f C_p} e^{-\frac{t}{T}} \sin(\omega t - \theta) + i_d(0) r_1 \quad (7)$$

由上述分析可知电路在理想情况下，谐振网络的等效阻抗  $r_1$  为零。 $T$  为时间常数，电路在初始状态下相角  $\theta = 0$ ，式(7)可表示为

$$V_p = \frac{i_d(0)}{\omega_f C_p} e^{-\frac{t}{T}} \sin(\omega_f t) \quad (8)$$

用 Matlab 仿真软件绘制  $V_p$  随时间  $t$  变化曲线如图 8 所示。从仿真图可知电路在进行能量交换过程中，电容两端电压呈减幅振荡状态，且存在过零点。

### 4 能量补充环节

由上述分析可知能量在振荡的过程中不断衰减直至为零。如图 9 所示。曲线中纵轴表示能量，电压，电流变化，横轴表示时间变化。

为了使开关管两端电压周期性过零以创造软开关条件，应使谐振槽路存储一定的能量。在本电路中，让开关管导通前电感中先存储足够的能量，让  $LC$  电路做近似等幅振荡，每当振荡回零时，导通开关管，此时  $AB$  两端电压被钳位至零，实现 ZVS 导通。这里引入一电流最大临界值  $I_{L0}$ ，当  $i_L = I_{L0}$ ，即电感预充电流等于或者接近这一最大值时，关断开关管。这时  $LC$  振荡槽路开始振荡，初始时刻电源为电感存储的能量，为  $LI_{L0}^2/2$ ，而且要使开关管两端的电压可以谐振回零。这样，每当开关管两端的电压谐振回零时就触发开关

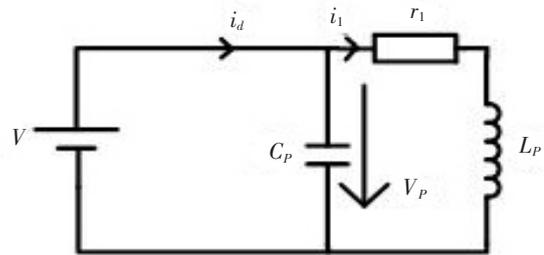


图 7 并联谐振电路等效电路模型

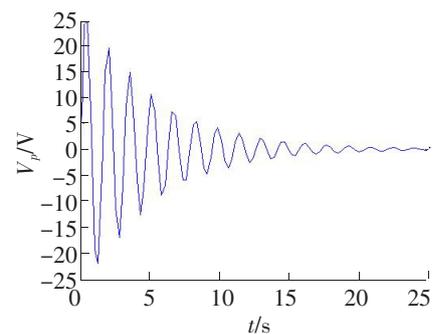


图 8 电容电压振荡电压

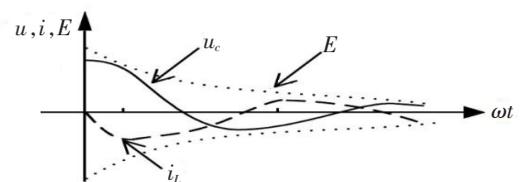


图 9 能量，电压，电流变化曲线

管导通,此时电源提供的电流为电感  $L$  充电,完成一次能量的补充,周而复始地进行下去便可使开关管做连续振荡,从而为逆变桥创造软切换环境。

当  $LC$  谐振网络处于无损状态时,只要电感预充电电流最大临界值  $I_{L0}$  等于此刻流过负载的电流值  $I_0$ ,那么电容两端的电压就与无负载时相同,电容两端电压便会做正负交替的等幅振荡,理论上实现能量无损运动。所以,在实际设计中应满足  $I_{L0} > I_0$ ,就可补充内阻损失掉的能量,且实现谐振软切换。

## 5 谐振型逆变器环流问题

### 5.1 环流的产生及危害

由上述分析可知,合理控制开关管通断可以为谐振槽注入能量,实现能量平衡以维持振荡。但在实际中,通过参考大量文献可知,使用该方法得到的谐振电容两端电压波形并非平滑的正弦波形,在过零点有明显的突变,这是因为在开关过程中有电流尖峰产生,即没有实现真正的零电压关断,在逆变回路中产生了环流。环流的存在对系统产生极大的影响,若环流过大,不但会使换流失败,而且会损坏开关管,使逆变“颠覆”。因此在设计电路时要先对环流进行分析。

环流的产生是由于硬切换引起的,目前导致非零切换的主要因素是频率的变化和开关管关断延时。关于频率的变化在文献[6]中有详细介绍,这里只分析开关管延时影响。导致开关管关断延时第一个原因是控制电路对谐振槽路采集信号时,由于驱动隔离的加入使得信号拾取时产生延时,时间为  $0.3 \sim 0.5 \mu\text{s}$ ,二是开关管关断时产生的拖尾电流出现延时,为  $0.2 \sim 2.5 \mu\text{s}$ 。本电路中,开关管关断如果不在谐振零点时会将电容短路掉,此时开关管中会有很大的电流流过,开关管会产生很大的  $di/dt$ ,这将使开关管应力增大,从而影响电路的稳定运行。

### 5.2 环流仿真模型

当电路中存在环流时,电源和电容被短路,环流会在电感,续流二极管,等效电阻以及开关管中流动<sup>[7]</sup>。这里假设  $T_1$  和  $T_4$  延后关断,那么  $VD_2$  和  $VD_3$  会导通续流,图 1 等效电路如图 10 所示。图中,  $R_L$  为电感内阻,  $R_1$  为开关管  $T_1$  内阻,  $R_2$  为二极管  $VD_2$  内阻,  $R_3$  为二极管  $VD_3$  内阻,  $R_4$  为开关管  $T_4$  内阻,  $T_1$  和  $VD_2$  的电流为  $i_2$ ,  $T_4$  和  $VD_3$  的电流为  $i_2$ , 电感电流为  $i_L$ 。由等效电路可知

$$R_{eq} = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (9)$$

列回路 KVL 方程

$$L_p \frac{di_L}{dt} + i_L (R_L + R_{eq}) = 0 \quad (10)$$

可得

$$i_L = i_0 e^{-(R_L + R_{eq})/L_p t} \quad (11)$$

那么

$$i_1 = k i_L \quad (12)$$

其中

$$k = \frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (13)$$

对此环流模型进行 Matlab 仿真,仿真参数选取:  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 0.001 \Omega$ ,  $R_L = 0.25 \Omega$ ,  $i_L = 30.8 \mu\text{H}$ ,  $i_0 = 36.2 \text{ A}$ ,可计算出等效电阻  $R_{eq} = 0.001 \Omega$ 。仿真得开关管电流如图 11 所示。

由曲线可知,当电路中产生环流时,开关管中的电流约为  $17.9 \text{ A}$ ,而正常工作的电流约为  $2 \text{ A}$ ,即开关管

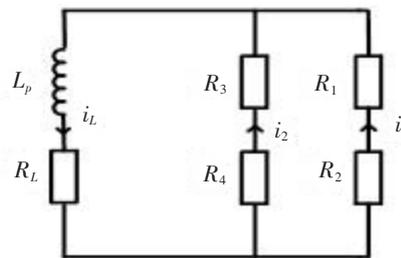


图 10 等效电路图

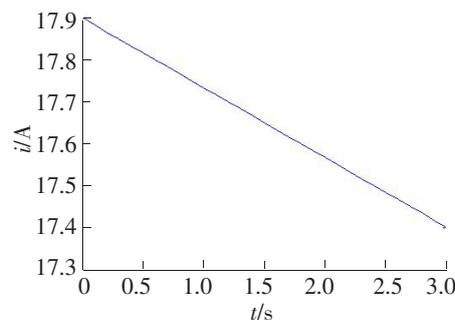


图 11 开关管电流变化曲线

中的电流将变化为正常工作时的 8~9 倍,对开关管产生极大的损害。所以,人们提出相关方法来抑制环流。

### 5.3 环流抑制方法

目前,环流抑制主要应用在电机的调速装置中,另外,也有学者研究不间断电源 UPS 中环流的产生和抑制,并取得一定成果。结合国内外学者的研究成果,总结出环流抑制的 2 种主要方法。一种是依靠主电路的结构去抑制,该方法是通过硬件设计去阻断环流通路,使之与主电路断开,可有效地解决回路环流问题。但该方法也有一定的弊端,使得电路硬件成本增加,且出现电流断续情况。另一种是通过软件编程去抑制环流的产生,该方法采用先进的控制策略,通过控制主电路主动抑制环流,是一种经济可靠的方法,本文采用该方法抑制环流的危害。可以通过控制信号相位补偿对驱动信号进行调节,即通过提前一角度  $\theta$  开通开关管可对延时信号进行补偿,从而保证谐振回零时切换开关管,实现软开关,且环流危害降为最小。其中  $\theta$  可由下式确定

$$\theta = 2\pi f t_d \quad (14)$$

$\theta$  的大小由开关频率和关断延时时间确定。

因此,只要检测出二极管续流时间就可求得环流时间。目前,信号处理器 DSP 功能强大,具有可靠的频率捕获能力,采用 DSP 可以方便且精确地求得环流持续时间<sup>[8]</sup>。在频率  $f$  和关断时间  $t_d$  都已知的情况下,带入公式(14)便可求得延时角,从而抑制环流。

## 6 结论

采用能量的观点分析了谐振变换电路的软切换过程,运用能量补充的方法对储能原件进行充电以维持振荡,使电路实现软开关,损耗降为最小。此外,还介绍了环流的危害和抑制措施,并搭建仿真模型对环流进行仿真。本文的分析思路基本可以克服传统方法对谐振电路分析的缺陷,在不改变拓扑结构的前提下,实现开关管的软化,极大地拓宽了对谐振软切换技术的研究手段。

## 参 考 文 献

- [1]李永东. 现代电力电子学原理及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2011.
- [2]王琳. 大功率变频电源并联控制技术的研[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2012.
- [3]Alsharqawi A. Batarseh I. Geeneralized State-plane Analysis of Soft-switching DC-DC Converters[J]. IEEE International Symposium on Cricuits and Systems,2002,5:521-524.
- [4]王聪. 软开关功率变换器及其应用[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [5]蔡宣三,龚绍文. 高频功率电子学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [6]王新民. 直接变频调速系统中的环流抑制[J]. 冶金自动化,1994,18(4):38-40.
- [7]夏尔宏,杨世兴. 逻辑无环流可逆调速数字控制系统设计[J]. 制造业自动化,2005,27:506-508.
- [8]邹彦. DSP 原理及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2012.

## Research on Energy Analysis of a Soft Switching Scheme for Harmonic

He Wei, Zhang Fusheng, Niu Yingzan, Luo Shuai

(School of electrical and electronic engineering, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang 050043,China)

**Abstract:** A new type of parallel resonant soft switching topology is designed in this paper. The working principle of resonant soft switching is introduced, and an energy supplement model is established. It is concluded that if switching tube is to go through zero periodically and achieve soft switching, the loss in the loop must be supplemented to maintain the conclusion of oscillation. Reasonable design of the switch tube, energy for the energy storage elements to maintain the shock, can create a zero voltage interval for the inverse bridge, so as to achieve soft switching.

**Key words:** soft switch; energy; resonance; soft cut