[高压电器]

基于串并联谐振全桥变换器的X光机高压电源设计和仿真

文/西门子（深圳）磁共振有限公司　肖亚辉

针对医用x光设备高压电源输出电压范围宽、响应速度快的要求，提出了一种采用串并联谐振结构的变换器，并进行了等效电路分析和电路仿真。结果表明在工作频率范围内，变换器输出电压与工作频率相关，输出电压范围宽、响应速度快，能够满足医用x光设备高压电源的输出要求。

传统的X光机高压电源采用工频变压器升压，通过整流滤波得到高压直流，存在体积大、效率低和纹波系数大等缺点。高频开关变换技术的发展，提高了开关功率密度，减少了无源器件如变压器的体积，促进了X光机的数字化和小型化。而过高的开关速度会带来开关管损耗的升高及电路噪声的增加，限制开关速度的进一步提升。为了解决开关速度提高带来的这些问题，谐振开关技术成为很好的解决方案。谐振开关技术可以使得变换器的工作电压和电流近似于正弦波，减少电路噪声；同时，开关器件能够实现软切换，大大降低开关损耗和开关应力。常用的谐振变换器有串联谐振（SRC）变换器和并联谐振（PRC）变换器。SRC变换器只能工作于降压状态，在轻负载状态下电压调节能力弱；PRC变换器则由于谐振环路存在大环路电流，不适合大功率应用场合。

广泛应用于医疗影像系统的X光机高压电源要求宽的电压输出范围（10～150 kV），同时为了减少辐射剂量和提高图像质量，要求毫秒级的输出电压响应时间。针对该类高压电源变换器的应用要求，本文对一种串并联谐振全桥变换器拓扑进行了研究，通过等效电路分析和电路仿真，验证了该变换器的宽输出范围特性和快速响应特性。

串并联谐振全桥变换器拓扑结构及原理

串并联谐振全桥变换器的拓扑结构如图1所示，变换器由谐波吸收电路、开关管、谐振腔、变压器和整流电路构成。直流电源侧的L_f、R_{f1}、

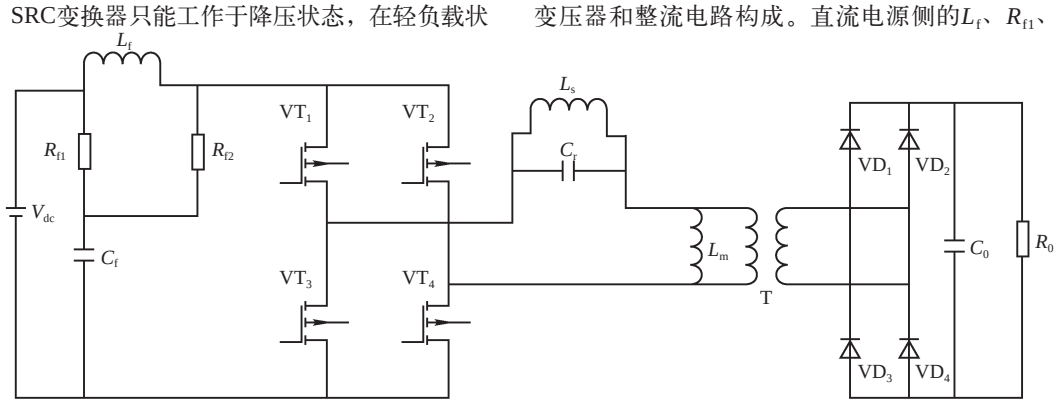

图1　串并联谐振全桥变换器拓扑结构

R_{f2}和C_f构成RLC谐波吸收电路；谐振电感L_s、谐振电容C_r和励磁电感L_m组成谐振腔；开关管VT_1、VT_2、VT_3和VT_4组成全桥逆变电路，其中VT_1和VT_4由一组开关信号驱动，VT_2和VT_3由另一组相位差为180°的开关信号驱动。为了简化分析，在此不考虑变压器一二次漏感。

由于谐波吸收电路和谐振电路的滤波作用，施加于谐振腔的电压和电流近似于正弦波。同时由于谐振电路储能元件的能量回馈作用，开关管可以实现零电压开通或零电流关断。因此和普通变换器相比，谐振变换器的开关管电压应力和开关损耗更低。

串并联谐振全桥拓扑的变换器具有良好的负载适应能力和电压调节能力。轻负载运行时，变换器开关频率接近于L_s和C_r组成的并联谐振腔的谐振频率，整个谐振腔具有较大的阻抗，实现与大负载阻抗的匹配；重负载运行时，变换器开关频率接近于串联谐振腔的谐振频率，整个谐振腔具有较小的阻抗，实现与小负载阻抗的匹配。

变换器工作时，并联谐振环路电流在L_s和C_r流动，实现磁场能量和电场能量的相互转换，不存在过多的能量消耗。因为该电流不流经变压器一次侧，所以不影响该变换器在大功率场合的应用。

串并联谐振全桥变换器等效模型

由于谐波吸收电路及串并联谐振电路的滤波作用，谐振腔的电压和电流近似于正弦波，所以在分析等效模型时可以只考虑方波的基波信号。变换器的二次侧等效模型如图2所示，其中I_0为负载电流，V_0为输出电压。

经过计算，折算后的二次等效负载为

$$R_{ac}^{*}=\frac{V_{RI}^{F}}{I_{ac}}=\frac{8V_o}{\pi^2 I_o}=\frac{8}{\pi^2}R_o \tag{1}$$

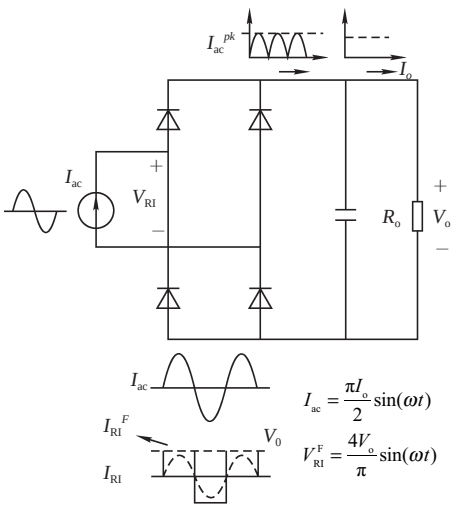

图2　变压器二次侧等效阻抗

考虑变压器一二次的线圈匝数比n（N_P/N_S），则映射到一次侧的等效负载为

$$R_{ac}=\frac{8n^2}{\pi^2}R_o \tag{2}$$

由此可以得到变换器一次等效模型如图3所示，变换器一次等效为LLC串并联电路。变换器一次输出电压V_P经高压变压器升压，最后输出X光机工作所需的高压。

变换器一次侧输出电压V_P相对于输入电压V_{ac}的增益可表示为

$$M=\frac{V_p}{V_{ac}}=\frac{j\omega L_m(1-\frac{\omega^2}{\omega_o^2})/\,j\omega(L_m+L_S)}{(1-\frac{\omega^2}{\omega_p^2})+j\omega L_p/R_{ac}} \tag{3}$$

其中

$$L_p=L_s/L_m$$

$$\omega_o=\frac{1}{\sqrt{L_sC_r}},f_o=\omega_o/2\pi$$

$$\omega_p=\frac{1}{\sqrt{L_pC_r}},f_p=\omega_p/2\pi \tag{4}$$

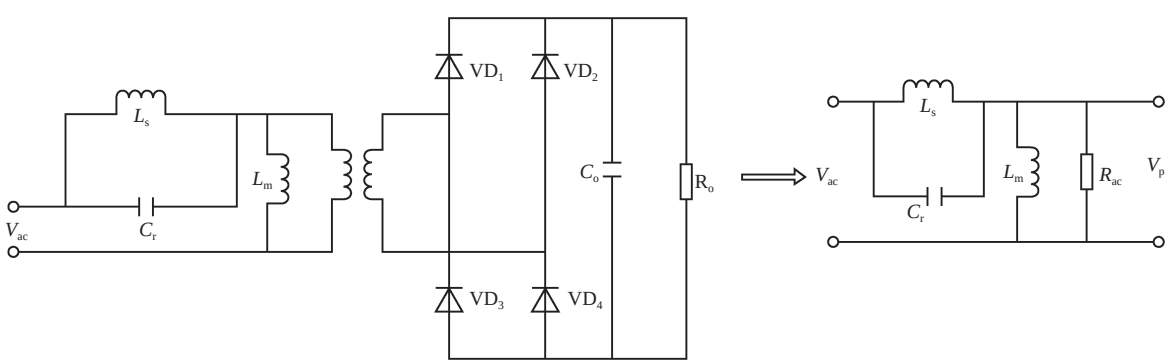

图3　串并联谐振变换器原边等效电路

从式（3）可以得出，该变换器有两个谐振频率f_o和f_p，其中f_o由L_s和C_r决定，f_p由L_s/L_m和C_r决定。对于X光机，励磁电感L_m远大于L_s。

$$K = L_m / L_s \tag{5}$$

利用仿真软件对上述等效电路进行频域仿真，用AC电压源作为信号源，得到输出电压增益随频率变化如图4所示。

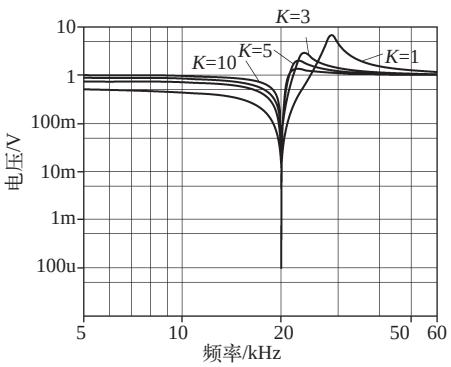

图4　串并联谐振变换器输出增益

从图4可知，变换器一次侧输出电压增益与开关频率和K相关。增益曲线有两个极值点，增益最小值出现在f_o附近，增益最大值出现在f_p附近。通常变换器工作在f_o右侧，以获得更大的增益频率比。当K值较小时，增益频率比相对较小；当K值不断增大时，f_p不断向f_o靠近，输出电压在f_o到f_p间的增益频率比也不断提高。增益的提高有助于提高变换器的动态响应速度，设计时K通常取5～10，以满足动态响应速度。同时较大的K值，可以减少变换器的开关频率范围，从而减少开关损耗。

串并联谐振全桥变换器仿真

采用仿真软件对变换器进行时域仿真，如图5所示。开关信号频率为20 kHz，占空比为30%，由波形发生器产生；K值为10；高压变压器的一二次侧和线圈匝数比为10/100，两路二次侧经过整流滤波分别输出正相高压和负相高压。

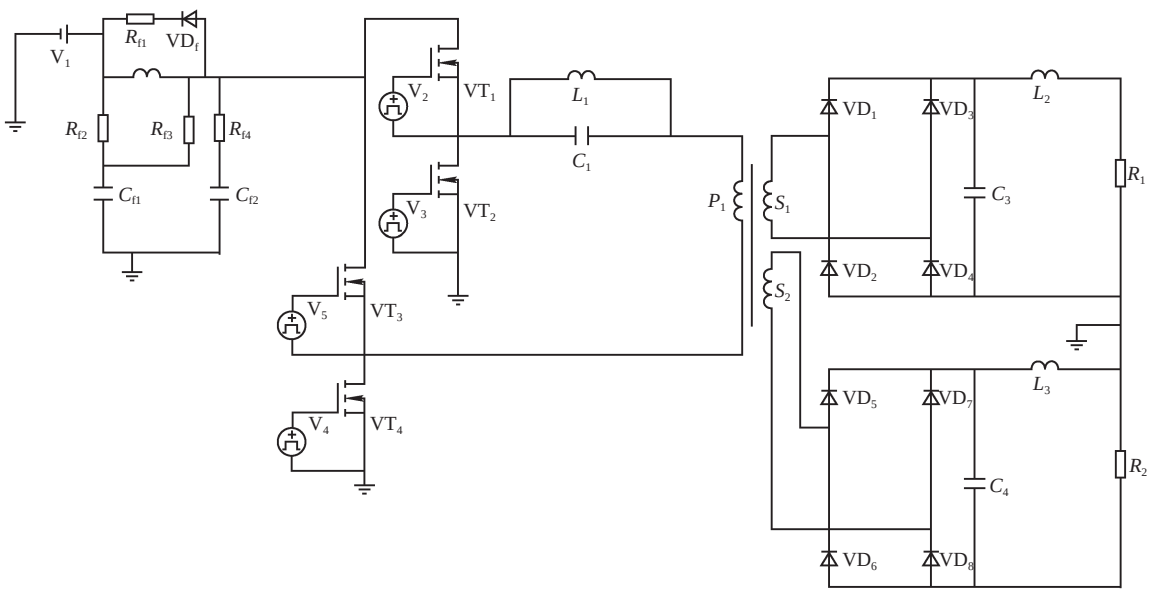

图5　串并联谐振全桥变换器仿真模型

开关管开关信号和开关电流关系如图6所示。为了利用谐振电路的谐振作用实现开关管的软切换，开关信号的占空比设为30%左右。开关管开通时，开关电流因为电路中感性元件的抑制作用，按正弦波形上升，无明显过冲；开关管关断时，开关电流已经下降为零，从而实现了开关管的零电流关断。开关管的开通和关断方式不但减少了开关损耗，同时也降低了电路噪声。

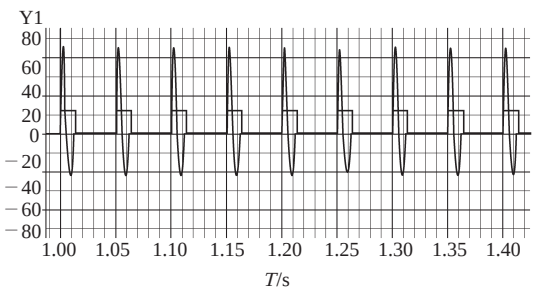

图6　开关管开关信号和电流波形

变换器正相高压端和负相高压端输出电压如图7所示。输出电压为±25 kV，电压在1 ms左右达到稳定状态，纹波小且无过冲现象。

结束语

本文对一种串并联谐振全桥变换器拓扑进行

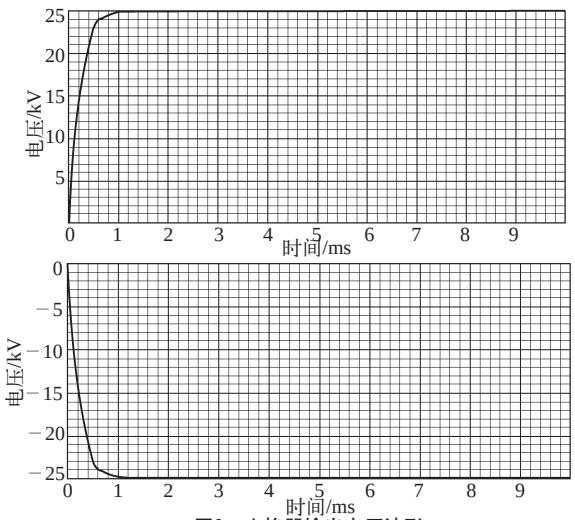

图8　变换器输出电压波形

了研究，分析了其工作原理及等效电路，通过软件对该变换器的增益特性及输出特性进行了仿真。结果表明，这种串并联谐振全桥变换器有如下优点：①输出电压与开关频率相关，输出电压范围宽；②变换器工作在谐振状态，开关管开通和关断损耗低，电路噪声小；③输出电压响应速度快，输出电压稳定无过冲。

对于要求宽电压输出范围和高动态响应速度的X光机高压电源，该串并联谐振全桥变换器有良好的应用前景。EA

（收稿日期：2020.04.15）
（编辑：朱金凤）

（上接第42页）

试验结果分析

测量使用不同年限带电作业绝缘手套的泄漏电流，取其平均值绘制曲线如图2所示。由图2可知，未使用的绝缘手套泄漏电流只有1.04 mA，使用0.5年的绝缘手套泄漏电流为1.57 mA，使用1年的绝缘手套泄漏电流为2.26 mA，使用1.5年的绝缘手套泄漏电流为3.08 mA，使用2年的绝缘手套泄漏电流为4.02 mA，使用2.5年的绝缘手套泄漏电流为5.23 mA；使用3年的绝缘手套泄漏电流为6.75 mA，均小于规定的9 mA，所以都能达到绝缘要求。

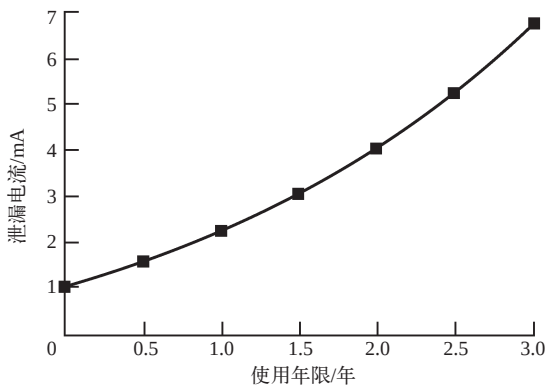

图2　使用不同年限绝缘手套泄漏电流曲线

最小二乘法通过最小化误差的二次方和寻找数据的最佳函数匹配，是进行曲线拟合的一种早期使用的方法。一般最小二乘法的拟合函数是一元二次，可一元多次，也可多元多次。该方法是通过求出数据点到拟合函数的距离和最小的拟合函数进行拟合的方法。通过不同年限绝缘手套泄漏电流的曲线可以看出，泄漏电流与绝缘手套的使用年限近似满足二次函数关系，因此，令$I=at^2+bt+c$，计算数据点到该函数所表示的曲线的距离和最小，即：$|\delta|=\sqrt{\sum_{i=0}^{n}(I(t_i)-y_i)^2}$。对式求导使其=0，则可以求出$I$的系数$a$，$b$，$c$，从而求解出拟合函数。

使用MATLAB将曲线拟合，可以预估得到绝缘手套的理论使用寿命，拟合后的表达式如下

$$I=0.371t^2+0.7593t+1.077$$

式中，I是泄漏电流，单位为mA；t是使用年限，单位为年。

将泄漏电流9 mA代入拟合表达式，可以计算出绝缘手套最大使用年限为3.71年。

结束语

通过对使用不同年限的带电作业绝缘手套进行交流耐压试验并测量泄漏电流值，可以得到如下结论：

1）绝缘手套使用年限越长，遭受电击、摩擦和受潮等因素后橡胶老化越严重，从而造成绝缘性能下降，泄漏电流增大。

2）建立使用年限与泄漏电流关系模型，计算得出绝缘手套理论最多使用3.71年，即使用3.5年需进行更换。EA

（收稿日期：2020.01.14）
（编辑：朱金凤）