变压器寄生参数对反激变换器的影响及其抑制措施

反激式开关电源广泛应用于多种开关电源系统中。随着开关电源工作频率的提高，变压器的寄生参数对反激式开关电源的影响变得越来越重要。建立了变压器带寄生参数的高频模型，并结合实际工作情况对其进行了简化。分析了RCD反激式开关电源的工作过程，并归纳了寄生参数对变压器和反激式开关电源的影响。提出了采用交叉换位的绕组方式减小变压器寄生参数的方法。通过建立变压器绕组模型进行仿真，验证了文中分析的正确性和抑制措施的有效性。

韩　闯　杨旭峰　程培源　边岗莹／空军工程大学防空反导学院

韩　闯／硕士研究生

关键词/Keywords
反激式开关电源·
寄生参数·
交叉换位技术·

0　引言

由于反激式开关电源的种种优点，目前反激式开关电源在开关电源市场上应用非常广泛。反激式开关电源的一个发展趋势是高频化，这就对其核心元件变压器的性能提出了更高的要求。由于变压器的寄生参数会降低开关管的耐压性，使变压器工作的可靠性变差，甚至使整个开关电源的变换效率和电流品质远远低于设计预期。因此，寄生参数对于开关电源的影响越来越变得不可忽视[1-2]。变压器的寄生参数分为漏感和分布电容。很多研究人员研究了某一种寄生参数对于开关电源的影响[3]。而现实情况中漏感和分布电容同时存在并影响开关电源的工作状态。本文主要分析变压器的寄生参数对于反激式开关电源的影响，在此基础上探讨抑制变压器寄生参数的有效措施。首先给出变压器的高频模型，分析了反激式开关电源的具体工作过程，归纳了寄生参数对开关电源工作状态的影响，最后提出采用改变绕组方式抑制变压器寄生参数的方法。

1　高频变压器模型

变压器寄生参数对反激式开关电源的影响随着开关频率的增加而越来越严重。在开关频率较低时，寄生电容的影响基本可以忽略不计，但随着开关频率的不断提高和输入输出电压的增大，分布电容对开关电源的影响会越来越大，采用只考虑漏感的变压器模型显然已经不能准确预测变换器的工作波形及解释实际工作中遇到的特殊现象[4]，必须同时考虑分布电容和漏感的影响建立变压器的模型。

采用有限元分析方法进行数值求解可以得到变压器的准确模型[5-8]，但存在着计算量较大的缺点。经过比较分析，本文认为采用如图1所示的二端口网络作为变压器的模型更适用于现实应用分析。图1中的变压器模型由电感、电容、电阻和一个理想变压器组成，其中C_{s1}、L_{s1}、L_m分别为一次侧分布电容、漏感以及励磁电感；R_1、R_m分别为与一次侧铜损及变压器铁损相对应的折算阻值；C_{s2}和L_{s2}分别为二次侧分布电容以及漏感；R_2

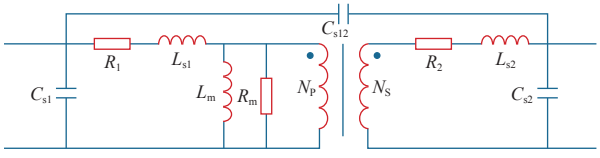


图1　高频双绕组变压器的二端口网络模型

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

为二次侧铜损相对应的折算阻值；C_{s12}为一次绕组与二次绕组的分布电容。

反激式开关电源多用于输入高输出低的变换情况，一般情况下变压器一次侧匝数较多，导致一次侧分布电容和漏感均较大，高压输入时对变换器产生的影响也较明显。二次侧匝数一般较少，因此分布电容和漏感均较小，低压输出时寄生参数储能变化较小，对电源的影响不大，在进行分析时可以忽略二次绕组的寄生参数，得到如图2所示的变压器简化模型。

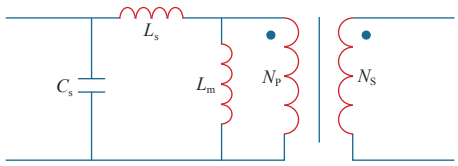


图2　高频双绕组变压器简化模型

2　寄生参数对反激式开关电源的影响

反激式开关电源有两种工作模式：连续导电模式（CCM）和断续导电模式（DCM）。断续导电模式由于开关管的开通损耗低、二极管无反向问题及能量变换效率高等优点而有十分广泛的应用。本文以如图3所示带有RCD缓冲电路的反激式开关电源为例，分析变压器的分布参数对于高频高压开关电源的影响。

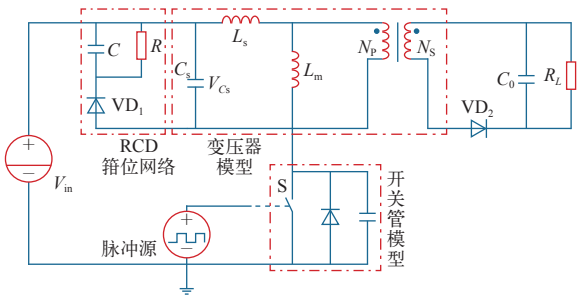


图3　反激式开关电源结构原理图

假设输出滤波电容足够大，钳位二极管VD_1为理想器件，所有电感、电容均为理想元件。开关电源一个周期共有四个工作过程，图4为主要工作波形。

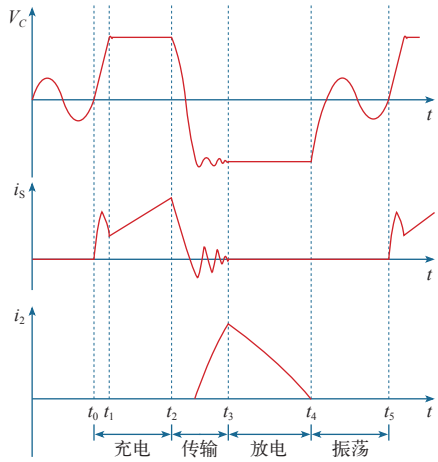


图4　反激式开关电源工作波形图

2.1　过程一

过程一工作原理如图5所示。

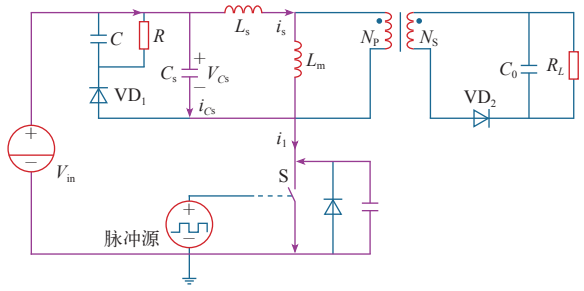


图5　过程一工作原理图

反激式开关电源工作在断续导电模式时，每个周期中开关管开通时电流为零。因此在开关管开通之前变压器一次绕组储能为零，此时L_s、L_m和C_s储能均为零。开关管承受的电压为V_{in}，结电容处于充电状态。$t=t_0$时刻开关管导通，结电容放电，电源将对变压器的分布电容、漏感及励磁电感充电。此时分布电容的两端电压发生突变，即

$$i_C = C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

由式（1）可得，其充电电流的幅值取决于开关管开通的速度，即

$$u_C = u_{Ls} + u_{Lm} \tag{2}$$

此时分布电容的电压在不断变化，故电感电压也在不断变化，即

$$i_L = \frac{1}{L}\int u_L \,\mathrm{d}t \tag{3}$$

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由式（3）得，此时电感电流呈现出一定的波动状态，波形如图4中t_0-t_1时段所示。至$t=t_1$时刻，开关管完全导通，此时分布电容C_s端电压稳定为V_{in}，由式（3）可知此时流过漏感L_s及励磁电感L_m的电流i_s开始线性增加。至$t=t_2$时刻完成漏感及励磁电感的能量存储。

2.2 过程二

过程二工作原理如图6所示。

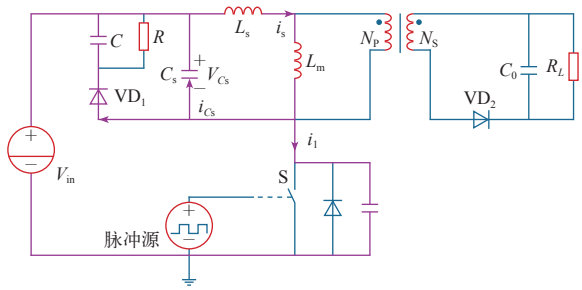


图6 过程二工作原理图

在$t=t_2$时刻，一次侧漏感L_s和励磁电感L_m充电电流线性增大至最大值，此时开关管关断，即

$$u_L = L\frac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t} \tag{4}$$

由式（4）得，开关管关断瞬间一次侧漏感L_s和励磁电感L_m产生巨大的反向电动势，对开关管结电容和一次侧分布电容C_s反向充电，因此励磁电感L_m中的能量传递到二次侧时会出现一定的时间延迟，如图4中i_2的波形所示。此后一次侧漏感L_s中储存的能量将会与一次侧分布电容C_s中储存的能量形成反复的充放电过程，在电路中形成高频振铃，对开关电源的电流形成谐波污染，必须要对其加以吸收。加上RCD钳位网络后，钳位电容C与一次侧分布电容C_s并联，大大减小了高频振铃的频率和幅度。当一次侧分布电容反向充电至$V_{Cs}=-V_0/n$时，二次侧二极管导通，二次电流i_2线性增加，一次侧励磁电感储存的能量传向二次侧，此能量传输过程将一直持续到$t=t_3$时刻。

2.3 过程三

过程三工作原理如图7所示。

在$t=t_3$时刻，变压器磁化电流线性下降，一次侧漏感中电流为零。此过程中开关管承受的电压

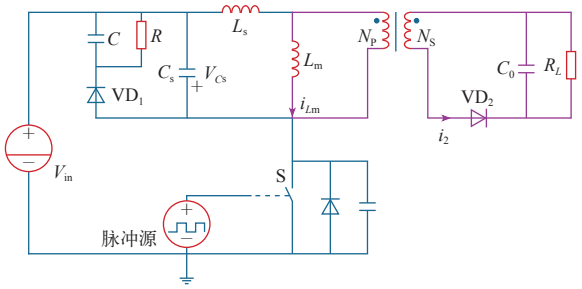


图7 过程三工作原理图

为：$V_D=V_{in}+(V_0/n)$，$t=t_4$时刻励磁电感中储存的能量传递结束。

2.4 过程四

过程四工作原理如图8所示。

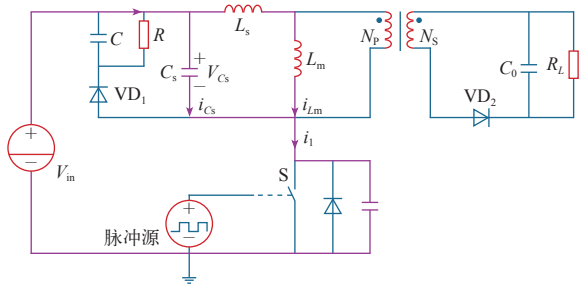


图8 过程四工作原理图

在$t=t_4$时刻励磁电感中储存的能量为零，二次侧二极管关断。由于电容和电感都是无损元件，故一次侧分布电容、漏感和开关管结电容形成谐振，分布电容两端电压出现振荡。

从以上开关电源的工作过程中可以看出，变压器的寄生参数对电路的影响可以归纳为以下几点。

1）一次侧充电过程中，分布电容两端电压发生改变，导致分布电容储能改变，在电路中形成电流尖峰，影响变压器和开关管的耐压性，进而影响整个开关电源的使用寿命。另外，开关管开通瞬间，对一次侧漏感充电，由于分布电容的电压不断变化，导致漏感及励磁电感的端电压发生变化，使漏感充电电流产生尖峰，影响变压器工作的可靠性。

2）在能量传输过程中，一次侧漏感及励磁电感中电流线性增加到最大，开关管关断瞬间漏感及励磁电感产生巨大的反向电动势。漏感的存在增大了反向电动势，降低了开关管工作的可靠性。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3）由于一次电压较高，分布电容储存的能量较大，变压器绕组电压发生瞬变时，在变压器内部产生高频振荡环流，使变压器损耗增大，且产生高频电磁辐射，影响电源中其他元器件的工作稳定性。产生的高频振荡环流耦合到整个电路中，增加电路中电流谐波，影响变换器电流品质。

4）变压器一、二次侧能量传输完毕后，由于电感、电容都是无损元件，漏感、分布电容以及开关管结电容发生谐振，产生振荡电压，影响变压器一次绕组的工作电压。

3　减小变压器寄生参数影响的方法

变压器的寄生参数由于形成原因不同，所以相应的减小寄生参数的方法也有区别。减小变压器的分布电容主要从绕组的工艺设计方面来考虑，主要方法：①Z型绕法；②分段式绕法；③蜂窝式绕法。但这些方法的绕制工艺较复杂，且要以降低窗口利用率为代价。减小变压器漏感的方法可以从以下方面考虑：①改进变压器绕组的绕法；②在变压器绕组上加吸收电路；③减小开关管的漏极到变压器的引线长度等。

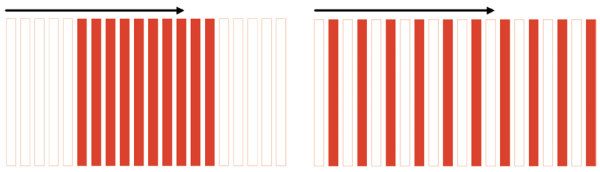
3.1　绕组结构对变压器寄生参数的影响

基于以上分析可知，能否很好地控制变压器的分布参数，不但影响变压器的工作效率，同样会影响变换器的工作状态。对于高频变压器来说，漏感是一个十分重要的参数。漏感与绕组产生的磁场中所储存的能量有关。由下式可以证明

$$\frac{1}{2}L_{\text{leak}}I^2=\frac{1}{2}\int_V \mu H^2\,\mathrm{d}V \tag{5}$$

式中，μ为绕组气隙的磁导率；V为绕组中气隙的体积；H为绕组中磁场的强度；I是绕组流过的电流。高频变压器的体积减小，使绕组中的气隙体积减小，减小了绕组的漏感。

为了验证不同绕组结构对于变压器漏感的影响，建立了不同绕法的绕组模型，如图9所示，其中黑色为一次绕组，白色为二次绕组。绕组模型包括三明治式和交叉换位式。仿真中使用OR49938EC型铁氧体作为磁心材料，在50 kHz时，



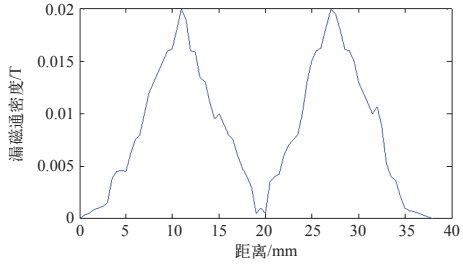
（a）三明治式绕组模型　　（b）交叉换位式绕组模型

图9　不同绕组结构模型

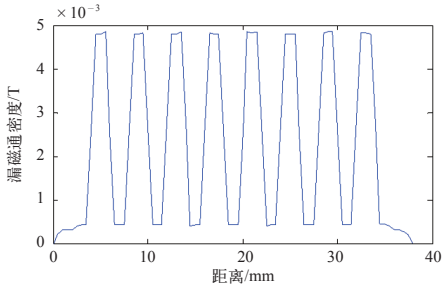
额定电压比为200∶100，额定电流比为5∶10，一、二次侧匝数比为2∶1。

3.2　仿真结果验证

在ANSYS软件中分别建立三明治式绕组结构和交叉换位式绕组结构的变压器模型，并对其匝间漏磁通密度进行仿真，仿真结果如图10所示。在图10a和图10b中，交叉换位式绕组结构的漏磁通密度最大只有5 mT，远小于三明治式绕组结构的漏磁通密度。因此这种结构下的变压器漏感也大大降低。另外，由于一、二次绕组交叉换位分布，绕组匝间可以很好地耦合，因此变压器的工作稳定性较高。由此可知，交叉换位式结构能够提高变压器的能量传输效率，具有可靠性良好等优点，是一种能够有效减小变压器漏感的绕组结构。



（a）三明治式绕组漏磁通曲线



（b）交叉换位式绕组漏磁通曲线

图10　不同绕组结构沿绕制方向漏磁通密度曲线

(下转第49页)

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

an extended kalman filter [C]. 1st International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 2004 (ICEEE), IEEE, 2004: 584-588.

[3] Piers R Z, Pereira L F A, Magnus M C, et al. Adaptive control of nonlinear systems applied to the three-phase induction motor with unknown mechanical parameters [C]. 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004 (2): 1105-1110.

[4] Campbell J, Sumner M. Practical sensorless induction motor drive employing an artificial neural network for online parameter adaptation [C]. Electric Power Applications, IEE Proceedings, IET, 2002, 149 (4): 255-260.

[5] Abdelhadi B, Benoudjit A, Nait-Said N. Application of genetic algorithm with a novel adaptive scheme for the identification of induction machine parameters [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20 (2): 284-291.

[6] Tofighi E M, Mahdizadeh A, Feyzi M R. Online estimation of induction motor parameters using a modified particle swarm optimization technique [C]. Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE, 2013: 3645-3650.

[7] 陈振锋，钟彦儒，李洁．感应电机参数辨识三种智能算法的比较 [J]．电机与控制学报，2010，14 (11)．

[8] Ursem R K, Vadstrup P. Parameter identification of induction motors using differential evolution [C]. The 2003 Congress on Evolutionary Computation, 2003 (CEC'03), IEEE, 2003, 2: 790-796.

[9] 金海．三相异步电动机磁链观测器与参数辨识技术研究 [D]．杭州：浙江大学，2006.

[10] 杜远远，张鹏，陈振江，等．基于传递函数的遗传算法感应电机参数辨识 [J]．电力学报，2013 (1)：32-34.

（收稿日期：2015－02－10）EA

(上接第33页)

4 结束语

本文建立了变压器的高频工作模型，并依据工程实际对模型进行了适当简化，详细分析了反激式开关电源的工作过程，在此基础上归纳了变压器的寄生参数对于开关电源的影响，提出了采用交叉换位技术来减小变压器漏感的方法。通过对三明治式绕组结构和交叉换位式绕组结构的变压器进行匝间漏磁通密度的仿真，验证了抑制措施的有效性。

参考文献

[1] 陆地，李翔，黄宝红，等．基于变压器一维模型漏感产生与减少研究 [J]．电源技术，2012，36 (8)：1154-1157.

[2] 高骏，高树国，刘海峰．变压器绕组的高频模型及其时域解法的研究 [J]．变压器，2009，46 (12)：37-42.

[3] 赵志英，龚春英，秦海鸿．高频变压器分布电容的影响因素分析 [J]．中国电机工程学报，2008，28 (9)：55-60.

[4] 刘军，郭瑭瑭，常磊，等．高频变压器寄生电容对串联谐振变换器特性的影响 [J]．中国电机工程学报，2012，32 (15)：16-22.

[5] 耿晓静，羊彦，景占荣．基于有限元仿真的反激变压器优化设计 [J]．电源技术，2010，31 (8)：842-844.

[6] 赵小军，李琳，程志光，等．应用谐波平衡有限元法的变压器直流偏磁现象分析 [J]．中国电机工程学报，2010，30 (21)：103-107.

[7] 李六零，胡攀峰，邱毓昌．不同变压器绕组模型对计算快速暂态过电压的影响分析 [J]．西安交通大学学报，2005，39 (10)：1160-1163.

[8] 杜建平，李岩，徐希强，等．基于有限元法的变压器分布电容参数计算方法的研究 [J]．变压器，2012，49 (2)：6-9.

（收稿日期：2015－04－19）EA

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net