

大功率高压高频变压器模式和损耗分析

陈桂文¹, 张周胜², 肖登明²

(1. 上海电力变压器修试厂有限公司, 上海 200436; 2. 上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 介绍了大功率、高压、高频变压器的特性及设计特点, 并对其设计模式及损耗特性进行了分析。

关键词: 高频变压器; 大功率; 损耗

中图分类号: TM401+.1 文献标识码: B 文章编号: 1001-8425(2009)01-0016-04

Mode and Loss Analysis of High Power, High Voltage and High Frequency Transformer

CHEN Gui-wen¹, ZHANG Zhou-sheng², XIAO Deng-ming²

(1. Shanghai Power Transformer Repair and Test Works Co., Ltd., Shanghai 200436, China;
2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The design and characteristics of high power, high voltage and high frequency transformer are presented. Its design mode and loss characteristics are analyzed.

Key words: High frequency transformer; High power; Loss

1 前言

近年来, 大功率(大于 10kW)、高压(大于 10kV)、高频(大于 20kHz)AC-DC 电源变换器的应用越来越广泛, 如应用于氩弧焊、静电除尘、脱水以及脱硫脱硝等工业领域。如图 1 所示, 这些工业过程需要获得一个高压 DC 的电源输出, 一般先通过逆变后经升压变压器整流输出。在这种大功率的高压开关电源中, 高频变压器的设计是项目的关键和难点, 其性能的好坏不仅直接影响到输出是否产生波形的畸变及能量传输的效率, 而且可能影响到功率开关器件的安全工作。

波形畸变, 并增加开关损耗; 通过变压器绕组中的电流往往是非正弦波形, 电流可能是连续工作状态和断续工作状态等。因此, 给这种变压器的设计带来困难。研究设计满足温升要求、损耗要求、绝缘要求以及寄生参数的大功率高压高频变压器具有现实意义。

对于静电除尘等工业领域, 其电源系统功率达几十千瓦, 电压达几十千伏, 对于这种大功率、高压的电源变压器而言, 通常采用分离和组合式设计, 其设计模式多种多样。受到高频效应和分布参数的影响, 其绝缘设计、损耗分析及控制在变压器分析及仿真阶段已变得尤为重要。

笔者分析了大功率、高压、高频变压器的主要方法与模式, 并对此类变压器的损耗控制进行了分析。

2 大功率高压高频变压器的设计特点

大功率、高压、高频变压器与普通变压器的设计方法不同, 主要表现在: 绝缘需求、寄生成分、空载损耗、负载损耗、电晕放电及整流等方面。一次绕组和二次绕组之间需要有效的绝缘厚度或距离, 以避免电场击穿。因此, 一次绕组和二次绕组之间的电磁耦合不像传统的低压变压器那样紧凑。对于一次侧来

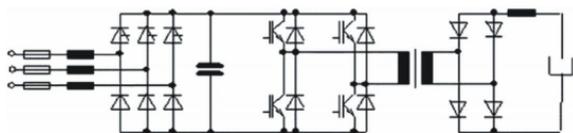


图 1 高压 AC-DC 开关电源

Fig.1 High voltage AC-DC switch power supply

大功率大电流会使损耗增大, 易造成热击穿; 邻近效应和集肤效应使损耗增大; 匝数比高、电压高使绝缘难于处理; 漏感和分布电容等寄生参数给前级功率开关管造成浪涌电压和浪涌电流, 使电压电流

说,这将导致寄生泄漏电感,从而影响变压器的最大功率容量。特别是在设计大功率、高压变压器的时候,如要保证足够的绝缘距离,就会有寄生电感产生。高压变压器一般会有比较大的匝数比,二次绕组的匝数较多,将产生较大的分布电容。对于二次侧来说,分布电容可达到匝数比平方的数倍,导致无效电流通过二次绕组,从而使变压器效率降低。电晕放电会严重地影响变压器的正常运行,任何尖角或凸出的地方易出现强电场,从而产生放电甚至绝缘击穿。

3 大功率高压高频变压器的模式

对于大功率高压开关电源,由于电压高,电流一般较大,硬开关 PWM 变换器受到变压器寄生参数的影响,易造成功率开关开通时产生浪涌电流,关断时产生浪涌电压,从而增加开关损耗。因此,现在一般采用谐振变换技术(即软开关技术),将变压器的寄生参数充分利用参与谐振,使通过功率开关的电流或电压波形为正弦波或准正弦波,实现开关的零电压(ZVS)或零电流(ZCS)开通与关断。因此,要使电源系统小型化,变压器的体积大小是关键。鉴于大功率高压高频变压器的设计难点以及电源系统小型化和稳定运行的需求,近年来,研究者尝试和采用了倍压整流、电源多重化、多元变压器以及变压器的多重化等设计模式。

3.1 倍压整流模式

倍压整流模式是在变换器的整流输出环节采用倍压整流技术,从而减小了变压器的升压倍数,使变压器的电压等级降低。电压等级降低了的变压器二次绕组与一次绕组的匝数比减小,从而减小了寄生电容。同时,变压器的绝缘设计相对变得比较容易,很大程度上减小了变压器的体积和整个电源系统的重量。其模式框图如图 2 所示。



图 2 高频倍压整流高压电源系统

Fig.2 HV power supply system of HF voltage-doubler rectifier

倍压整流电路只能在负载较轻的情况下才能正常工作,对于如静电除尘等需要大功率电源的情况下,由于电流较大,采用倍压整流将会使电压降低,达不到所要求的电压输出,因此倍压级数不能太高,

一般最多为二级倍压为宜。

倍压电路在正常工作状态下,输出电压很稳定,但是当负载出现短路或者负载电场击穿放电(静电除尘)时,倍压整流电路将产生超过正常电流几十倍的浪涌电流,对电源系统的安全运行带来影响。因此,必须采取有效的保护措施加以防范,如在负载处串联限流电阻等。

3.2 变换器多重化模式

变换器多重化通过将多台变换器并联或串联起来使整机的容量变大,通过变压器或者各相的电感将多个输入(输出)电压或电流组合在一起,通过相位调节消除低次谐波,改善输入、输出波形的质量。其模式框图如图 3 所示。

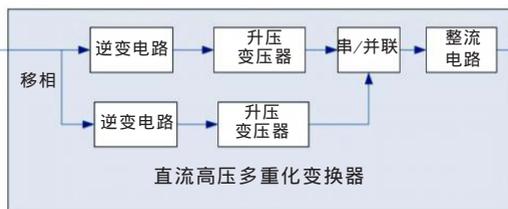


图 3 串/并联单相二重变换器电源系统

Fig.3 Power supply system of series/parallel single-phase duplicative converter

同样,变换器的多重化可以使单个变压器的升压倍数减小(串联)或者功率容量减小(并联),从而减小寄生参数和有利于绝缘设计,或者减小铁心的有效截面积,因此减小了变压器的体积和整个电源系统的质量。并且,变换器的多重化通过相位调节可以减小或者消除低次谐波,有利于减小变压器的损耗。但是变换器的多重化对于电流的平衡和干扰的影响较敏感,且成本较大。

3.3 多元化变压器模式

多元化变压器模式是将多个较小容量的变压器串(并)联起来,以实现变换器单机容量的增大或者单机电源系统的升压等级。其模式框图如图 4 所示。

这种模式中,各个元变压器磁路相对独立,通过各个元变压器一次绕组和二次绕组的串/并联连接来实现所需要的变比。由于漏感近似与绕组匝数的平方成正比,因此,每个元变压器将具有较小的漏感,如果绕组采取并联连接,漏感会更加减小,使变压器在高频下具有高的效率。多元设计同时减小了各个元变压器的体积大小,并且由于各个元变压器相互分开,有利于散热。

各个元变压器较低的转换电压将减小前级的开关损耗。漏感的减小易使外部电感形成谐振回路,通过 PWM 控制改善波形和响应特性。但是这种

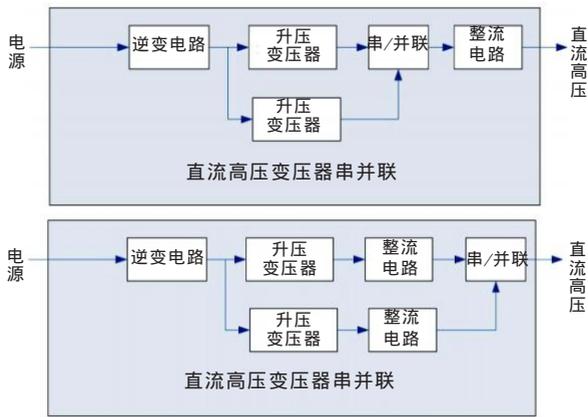


图 4 串/并联变压器(整流)电源系统

Fig.4 Power supply system of series/parallel transformer (rectifier)

模式必须使之承受的电压(电流)平衡。否则,易产生载波及其边频带的谐波,使装置的效率大大下降。特别是在将整流电路进行串/并组合时,如一部分元变压器驱动一个全波整流桥,而另一部分元变压器驱动另一个全波整流桥时,为了使承担的电压(电流)相等,必须采取均压或均流措施。

3.4 多重化变压器模式

多重化变压器是在单台变压器内部各个线包之间进行串/并联组合,或者各个线包单独输出,以实现所需要的功率和电压输出。各个线包之间具有公共的磁路。在大功率、高压、高频逆变器开关电源中,升压变压器一般一次侧电压较低,二次侧电压较高,通过一次侧绕组的电流很大,二次侧绕组匝数多。因此,多重化变压器一般是将二次绕组分成多个线包,各个线包进行串/并联组合或者单独输出。其模式框图如图 5 所示。

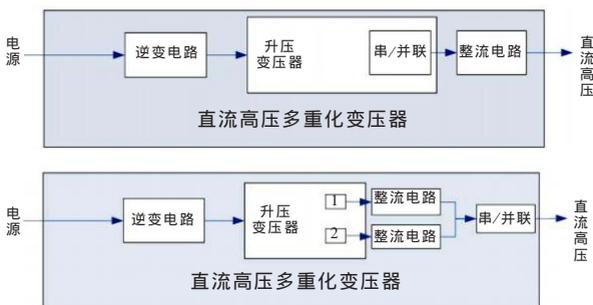


图 5 多线包变压器电源系统

Fig.5 Power supply system of more winding-claws transformer

多重化变压器模式由于各个线包具有公共的磁路,耦合性和同步性较好,具有相对较低的生产成本。同时,也可根据不同的负载电压和电流的要求进行组合,还可以在单台变压器提供多种电压等

级输出。但是,由于都在同一台变压器内部实现,局部发热、绝缘处理、漏磁损耗和寄生参数等需要根据具体要求进行优化设计。特别是高压二次侧线包进行串联连接的多重化设计,线包数量、绕组层数、绕组高度、线包间表面爬电距离等需要留够裕量,同时得充分考虑变压器的体积大小。

4 大功率高压高频变压器的损耗分析

4.1 空载损耗分析

由于高频变压器的空载损耗和负载损耗都与频率有关,因此,在一定频率和磁通密度的情况下,变压器的空载损耗由铁心材料的性能决定。选择高频变压器的铁心材料是设计过程中首先要考虑的。另外,铁心的几何形状对空载损耗同样有影响。

变压器的磁感应强度受两方面限制:磁性材料饱和磁感应强度的限制和铁心的损耗引起的可允许温升的限制。对于前者,通常将工作磁感应强度取为饱和磁感应强度的 $1/3$ 左右,以确保变压器在正常工作时不会饱和。因此,为了减小变压器的体积,往往会片面追求高饱和磁感应强度的铁心材料,而忽视了第二个限制。而可允许温升限制主要由铁心的损耗决定。

大功率高压高频变压器,由于功率大,损耗造成的发热不可轻视。因此,对于大功率高压高频变压器的设计,需要高饱和磁感应强度的铁心材料,但同时,铁心材料和工作磁感应强度的选取需要同时兼顾两方面的限制,对于温升满足不了要求的铁心,可适当降低工作磁感应强度的取值。

相比较而言,铁氧体、超微晶合金材料和 EE 铁心结构值得选择。当变压器功率很大时(大于 20kVA),为了减小变压器体积,可以选择超微晶合金材料。

4.2 负载损耗分析

国内外在围绕减小绕组损耗和对设计参数进行优化方面投入了大量的研究。由于 AC 损耗主要受集肤效应和临近效应的影响,所以对于高频变压器,研究多集中于对绕组层厚和 AC 电阻的优化方面。

另外,从减小绕组损耗的角度来看,除了 AC 电阻、最优绕组层厚以外,开关频率、最优绕组层数以及最优绕组高度等参数都会产生影响,这些参数需要参与综合优化设计中。

开关电源中往往是非正弦的或准正弦的电流波形,谐波造成额外的交流损耗。非正弦电流通过傅立叶变换被分解成傅立叶成分,根据绕组谐波电流的幅值和频率,通过 Dowell 公式可以计算每个谐

神经网络在变压器谐振频率计算中的应用

张启峰, 赵 方
(中原工学院, 河南 郑州 450007)

摘要: 提出了应用人工神经网络计算变压器谐振频率的方法。

关键词: 变压器; 谐振频率; 人工神经网络

中图分类号: TM401+.1 文献标识码: B 文章编号: 1001-8425(2009)01-0019-03

Application of Artificial Neural Network to Resonant Frequency Calculation of Transformer

ZHANG Qi-feng, ZHAO Fang
(Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: The method to calculate resonant frequency of transformer with artificial neural network is presented.

Key words: Transformer; Resonant frequency; Artificial neural network

1 引言

随着电力系统向大容量、远距离输送方向发展, 高压直流输电(HVDC)技术已获得越来越广泛的应

用,特别是最新的轻型高压直流输电(LightHVDC)技术的发展及广泛应用。而由HVDC系统中的换流站产生的无线电频率(RF)和电磁(EM)噪声,将会影响邻近的通信及计算机设备和载波系统的运行。因

波成分所带来的损耗。由于谐波成分为正交的,所以整个损耗等于各个谐波成分损耗之和。因此,改善通过变压器的波形质量是减小负载损耗的有效方法之一。

大关系。对于大功率高压变压器,空载损耗的设计需要考虑可允许温升限制、最优绕组层数、波形质量以及寄生电感的影响。

5 结束语

笔者分析了大功率、高压、高频变压器的设计特点、设计模式以及损耗控制。

倍压整流模式、变换器多重化模式、多元化变压器模式和多重化变压器模式成为需要大功率、高电压的工业领域电源系统的主要模式,在这些模式中,通过串/并组合使得变压器的设计变得相对容易。

变压器空载损耗和负载损耗与开关频率有很

参考文献:

- [1] 龙海峰, 吴道静, 郭世明. 高频链中高频变压器的分析与设计[J]. 电源技术应用, 2004, 7(4): 197-199.
- [2] 齐虹, 陈冲, 颜玉崇, 等. 静电除尘用高频高压功率变换器[J]. 福州大学学报, 2006, 34(2): 216-219.
- [3] 王广州, 师宇杰, 唐丽焕, 等. 串并联谐振倍压变换器高压电源的设计与研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 98-101.
- [4] 曲振江, 马文娟. 高压静电设备中倍压整流电路的工作状态分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 64-66.

收稿日期: 2007-10-11

作者简介: 陈桂文(1975-), 男, 江苏淮阴人, 上海电力变压器修试厂有限公司助理工程师, 从事电力变压器电气试验方面的研究工作。