

DOI: 10.7652/xjtuxb201506016

级联 H 桥型多电平逆变器中变压器 偏磁抑制控制方法研究

李宇飞¹, 王跃¹, 冯宇鹏², 张建², 姚为正²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 许继集团有限公司, 461000, 河南许昌)

摘要: 为了抑制级联 H 桥型逆变器连接变压器时存在的变压器偏磁现象,通过对变压器偏磁现象的形成机理研究,发现变压器原边电压和副边电流的直流分量是造成变压器偏磁现象的主要原因。根据变压器偏磁原因,提出了几种通过抑制逆变器滤波电感电流中直流分量来消除原边电压直流分量的控制策略。通过对比分析发现,电压反馈辅助以滞环控制器和检测电感电流的偏磁抑制控制器的控制策略动态响应较快,偏磁抑制比较彻底。在样机平台上进行了实验,结果表明,偏磁抑制控制器的控制策略可以完全消除级联 H 桥型逆变器的变压器偏磁现象,并且在投切电阻负载实验中,电压恢复时间仅在 20 ms 以内。

关键词: 级联 H 桥;多电平;变压器;偏磁;抑制

中图分类号: TM46 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)06-0096-07

Control Scheme of Transformer Magnetic Bias Suppression in Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters

LI Yufei¹, WANG Yue¹, FENG Yupeng², ZHANG Jian², YAO Weizheng²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xuji Group Corporation, Xuchang, Henan 461000, China)

Abstract: When a transformer is connected to a cascaded H-bridge (CHB) multilevel converter, transformer magnetic bias usually appears. The mechanism of the transformer magnetic bias, is discussed, and it is concluded that the DC components of the transformer primary-side voltage and secondary-side current result in magnetic bias. Then several control strategies are proposed and compared to eliminate the DC-component voltage of the primary-side by suppressing the DC-component inductor current in the filter of the CHB inverter. The voltage feedback associated with hysteresis controller and magnetic bias suppression controller has faster dynamic response and more complete magnetic bias suppression. This control strategy is able to eliminate magnetic bias in CHB inverter completely in the resistance load switch on and off experiment, and the voltage restoring time gets less than 20 ms.

Keywords: cascaded H-bridge; multilevel; transformer; magnetic bias; suppression

随着电力工业中电气设备的电压和功率等级的不断攀升,多电平变流器开始在高电压等级的应用场合扮演越来越重要的角色。级联 H 桥型多电平

变流器^[1]在大功率、高电压场合具有良好的适应性。不同于中点电压箝位多电平变流器^[2]和飞跨电容多电平变流器^[3],级联 H 桥型多电平变流器并不需要

收稿日期: 2014-10-15。 作者简介: 李宇飞(1987—),男,博士生;王跃(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家“863 计划”资助项目(2012AA050206);新世纪优秀人才支持计划资助项目。

网络出版时间: 2015-03-20

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150320.1729.001.html>

大量的电容或者二极管,结构和控制上更加灵活和简单,并具有容错能力。

应用于不同场合的级联H桥型拓扑会表现出不同的技术难题,变压器偏磁问题出现在某些需要连接变压器的特殊场合,例如:①变流器直流母线电压不够高,输出电压需要高于直流母线电压的情况,变压器需要抬高输出电压;②变流器直流母线电压比较高,输出电压比较低,并且额定电流很大,此时变压器需要进行电压和电流的调节;③变流器的输入和输出端是需要隔离的,此时需要接入变压器。

当变压器铁芯中的磁感应强度含有直流分量时,磁感应强度的平均值就会偏离零值,此现象被称为变压器的偏磁现象^[4]。偏磁现象最终会导致变压器饱和,严重的饱和甚至会带来毁灭性的影响,包括:①变压器饱和会引起过大的励磁电流,进而造成过电流;②励磁电流含有谐波电流成分,会引起输出电压的畸变;③过大的励磁电流会引起变压器的温升以及过大的噪音^[4]。很多学者对变压器的偏磁现象进行了研究^[5-17],文献[5-7]指出电力变压器偏磁主要由中性点接地的大地直流电流和地磁风暴引起,并提出了抑制变压器偏磁的硬件方法,即改变主电路的方法。文献[8]分析了电力变压器直流偏磁引起的变压器振动现象。文献[9-10]分析了直流偏磁对单相和三相变压器的影响。文献[11]得出了直流偏磁情况下变压器励磁电流的模型。文献[12-17]介绍了电力电子变流器中变压器偏磁的抑制策略,其中文献[12-14]分别研究了基于死区调节的单级桥式功率因数校正(PFC)AC/DC变换电路的偏磁抑制策略,以及动态电压恢复器(DVR)注入变压器的直流偏磁抑制策略,文献[15-17]均涉及到通过改变硬件电路来抑制变压器直流偏磁的方法。通过这些研究可以看出,不同于传统的输电网中的变压器,接入电力电子变流器的变压器更容易产生偏磁问题,所以解决变流器的变压器偏磁问题是至关重要的。

目前,很少有文章提到对于级联H桥型逆变器接入变压器这种情况的偏磁抑制控制策略,本文首先研究了逆变器接入变压器产生偏磁现象的机理,根据偏磁现象的成因,提出了适用于级联H桥型多电平逆变器的偏磁抑制控制方法。通过进一步的分析和对比,得出单电压环反馈加偏磁抑制前馈的控制方案动态响应更快,同时具备偏磁抑制能力。最后,通过级联H桥逆变器样机上的实验结果充分证明了所提控制方法的有效性。

1 偏磁现象机理

1.1 变压器偏磁的主要原因

图1是连接逆变器的单相变压器示意图,根据安培环路定理,有

$$Hl = N_1 I_1 + N_2 I_2 \quad (1)$$

式中: I_1 和 I_2 分别表示原边和副边线圈的电流; H 代表铁芯内的磁场强度; N_1 和 N_2 分别代表原边和副边线圈匝数; l 代表铁芯回路长度。当变压器原边电压 U_1 呈现周期性时,原边电流 I_1 和铁芯的磁通 ϕ 亦为周期性的,因此 U_1 、 I_1 和 ϕ_1 可以用傅里叶级数表示为

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_{1dc} + \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \cos(k\omega_0 t + \alpha_k) \\ I_1 &= I_{1dc} + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \cos(k\omega_0 t + \beta_k) \\ \phi_1 &= \phi_{1dc} + \sum_{k=1}^{\infty} \phi_{km} \cos(k\omega_0 t + \gamma_k) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: U_{1dc} 、 I_{1dc} 和 ϕ_{1dc} 分别代表了 U_1 、 I_1 和 ϕ_1 中的直流成分。

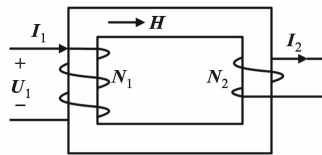


图1 单相变压器示意图

磁感应电动势平衡方程为

$$U_1 = R_1 I_1 + L_{1\sigma} \frac{dI_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi_1}{dt} \quad (3)$$

式中: R_1 和 $L_{1\sigma}$ 分别为变压器原边线圈等效电阻和漏感。将式(3)代入式(2),得

$$I_{1dc} = \frac{U_{1dc}}{R_1} \quad (4)$$

假设 H_{dc} 和 I_{2dc} 分别为 H 和 I_2 的直流分量,磁场强度的直流分量是引起变压器饱和的主要原因。结合式(1)和式(4),得

$$H_{dc} = \frac{1}{l} \left(N_1 \frac{U_{1dc}}{R_1} + I_{2dc} N_2 \right) \quad (5)$$

从式(5)可以看出,引起变压器偏磁现象主要有两个因素:一个是变压器原边电压的直流分量;另一个是变压器副边电流的直流分量^[18]。

假设二极管半波整流器被当作逆变器的负载时,变压器副边电流会产生直流分量,因此为了避免偏磁,这种负载是不能被连接在有变压器的逆变器中的。在一般情况下,原边线圈等效电阻 R_1 是非

常小的,因此即便原边电压的直流分量比较小,偏磁现象依然会很严重。从这个角度来讲,变压器原边电压的直流分量是产生偏磁现象的主要原因。

1.2 电压的直流分量

图2所示为一个典型的输出端口连接变压器的单相全桥逆变器,其中的LC滤波器用于滤除开关纹波。图3所示为瞬时值反馈控制策略示意图,这种方法被广泛用于逆变器控制,尤其是不间断电源^[19-20]。反馈电流既可以是LC滤波器电感电流,也可以是LC滤波器电容电流,不同的反馈电流带来不同的控制系统特性^[21-22],此种瞬时值控制方法存在偏磁问题的可能性。对于一个正常运行的瞬时值控制系统,控制环路是不应该出现直流分量的,所以需要找出引起直流分量的原因。

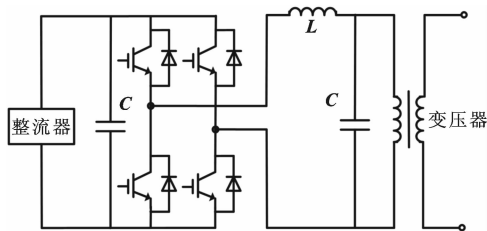


图2 典型的输出端口连接变压器的全桥逆变器

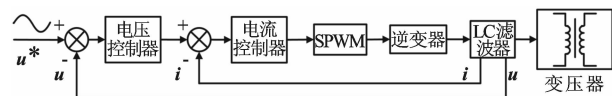


图3 瞬时值反馈控制策略

(1)指令信号中的直流分量。因为变压器是没有传输直流分量的能力的,因此指令信号中的直流分量确实可以给原边电压带来直流分量,但是此直流分量无法传递到副边。如同前面所分析的,原边电压直流分量是变压器偏磁的主要原因。

(2)传感器的零漂。在瞬时值反馈控制中,电压或者电流传感器的精确度和采样速度是控制系统性能的重要因素。可以肯定的是,传感器的工作原理决定了传感器的零漂现象是永远无法消除的,只有通过校准尽可能降低误差,但是无法消除零漂。如果控制系统使用PI控制器,那么一个很小的误差也会造成单向积分饱和。

(3)死区时间、半导体器件以及驱动电路的不一致性。对于一个具体的系统,参数或特性的不一致程度是固定的,因此该因素造成的变压器原边电压的直流分量一般不随系统的温度和运行时间而改变。

2 偏磁抑制控制策略

针对逆变器接入变压器的情况,研究者们提出

了很多抑制偏磁现象的控制方法:①在变压器原边串联电容器,由于电容器的隔直特性,直流分量电压可以被阻止进入变压器原边却给系统带来低频扰动,只有很大的电容才能避免系统低频扰动,但是又会增加成本和系统体积^[15];②采用半桥逆变器拓扑^[16],亦会带来副作用,包括流过半导体和直流电容的电流比全桥拓扑更多以及需要考虑直流电容电压的均压问题;③给瞬时值反馈控制法的前向通道加入高通滤波器^[17],此方法对消除偏磁有效果,但是同时带来控制环路的相位延迟,进而导致控制器参数难以选择,并且影响控制系统性能。

图4所示为级联H桥型逆变器的样机拓扑图。该样机由3个H桥级联而成,直流侧电压分别由3个三相PWM整流器提供^[23],其中3个变流器的电网侧是由变压器隔离的,因此直流侧也是隔离的。级联H桥逆变器采用三电平移相载波调制(PSC-PWM),这种调制策略具有谐波小、输出带宽高、能在较低开关频率下实现较高等效开关频率等优点^[24]。为了对级联H桥逆变器的偏磁抑制控制策略进行对比研究,图5给出了几种不同的控制方案,可以比较清晰地看出偏磁抑制控制策略的研究思路。

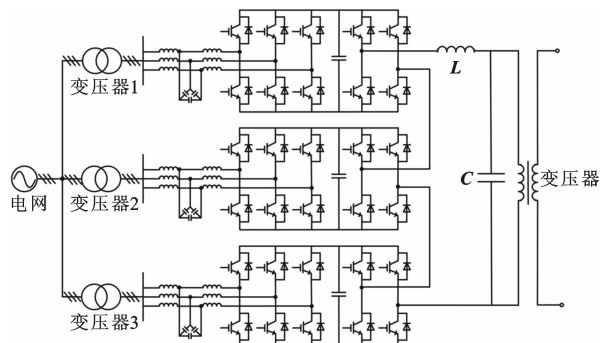


图4 级联H桥型逆变器样机拓扑

方案1为电压外环加电流内环瞬时值反馈控制,其参考电压为正弦信号,反馈量是滤波器的电容电压和电感电流(或者电容电流)。反馈电容电流的控制方法具有更好的动态响应,而反馈电感电流使得控制系统具备过流抑制能力^[21-22]。本文所讨论的电流反馈均为电感电流反馈。由于控制环使用PI调节器,传感器的零漂或者其他原因引起的非常微小的直流偏置都会被积分器累积起来,进而导致输出的调制波信号单边积分饱和,其峰值到达限幅器的最高或最低值。此外,电流内环的积分器也会加速这种效应。一旦调制波中含有直流分量,级联H桥型逆变器输出电压中就会含有直流分量,变压器

原边电压正负波形不对称,变压器就会产生偏磁问题,因此此种方法不适用于连接变压器的级联 H 桥逆变器。在更严重的情况下,即便采用斜坡指令逆变器也无法进行启动,这在实际工业应用中是非常危险的。

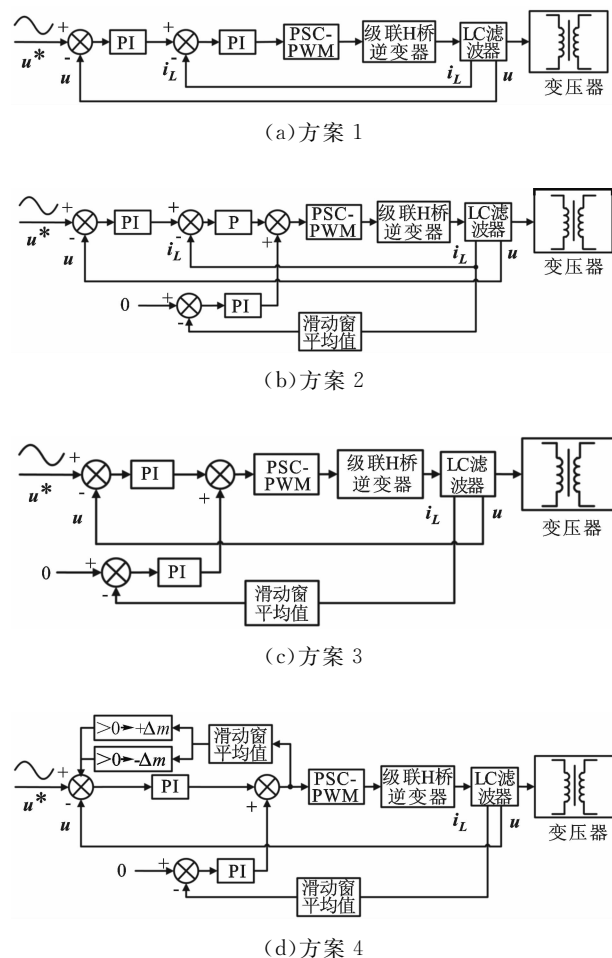


图 5 偏磁抑制控制方案

为了避免级联 H 桥型逆变器调制波中含有直流分量,可以通过检测变压器原边电流的直流分量,进而根据此直流量来计算调制波的校正量,将调制波中的直流分量控制到比较小的范围内。在方案 2 中,控制环中增加了一个偏磁抑制前馈环节,偏磁抑制环节直接对调制波进行校正,通过计算电感电流的滑动平均值来保证电感电流中不含直流分量^[17],也就保证了原边电压不含直流量。外环的 PI 调节器可以保证足够的低频段增益,从而保证了对指令信号的良好跟踪^[21]。电压传感器的零漂会造成电压环输出包含直流偏置,在偏磁抑制环节的作用下,电压环输出会形成正反馈,不断向正向或者负向累积,直到积分饱和,达到 PI 调节器的限幅值。此时,虽然逆变器输出电压不会再含有直流分量,但是最

终的输出电压会因为电压环输出的单边饱和而出现正弦波消顶现象。由于电压传感器的零漂在实际运行中无法完全消除,即便零漂被校准到非常小的范围,在这种控制方案下,电压环依然会由于正反馈现象而单向饱和,此时电压环调节能力变差,动态响应能力也会变差。需要指出的是,在此控制策略中,如果内环使用 PI 调节器替代 P 调节器,在合适的 PI 参数下,级联 H 桥型逆变器输出电压不会出现电压消顶现象,此时电压环亦会饱和,并且由于内环积分环节的作用,控制器失去电压调节能力,在级联 H 桥型逆变器负载发生突变时(最恶劣的情况),电压无法恢复。

方案 3 是单电压环反馈,并以检测电感电流的偏磁抑制环作为前馈环节。这种控制方案可以最终输出电压跟踪指令,并且由于只有电压反馈环节,动态响应速度快于含有电感电流反馈的双闭环控制。但是,如果电压传感器的零漂未得到校准,电压环会单向饱和,从而使得输出电压存在消顶现象。即便传感器零漂被校准到一个很小的范围,电压环依然会有单向饱和现象,削弱电压环的动态调节能力。如果级联 H 桥型逆变器负载发生突变,其输出电压虽然可以恢复,但是会有一个不小的畸变时间。其原因在于:控制电感电流偏置的外环含有电感电流的滑动平均值计算,在电流突变瞬态,其计算结果不能快速地恢复至准确值;另外,电压环的单向饱和在一定程度上削弱了控制环对电压的恢复能力。

在方案 4 中,为了有效消除电压环的单向饱和现象,除了偏磁抑制前馈环节以外,电压环中还额外增加了一个滞环控制器。其原理是:当电压环输出平均值在某个时刻为正时,给电压反馈量增加一个增量 Δm ;当电压环输出平均值在某个时刻为负时,给电压反馈量减去一个 Δm 。 Δm 根据控制器标幺值单位量确定,不宜过大也不宜过小,若过小起不到效果,若过大则会引起电压振荡。通过此滞环控制器和偏磁抑制控制器的双重作用,级联 H 桥型逆变器输出电压中的直流量绝对值可以被控制在一个很小的范围内,此直流量不会向一个方向累积,从而消除了变压器的偏磁现象。另外,由于控制器只有单电压环,因此此控制方案的动态响应速度也是较快的。实际上,若在方案 2 中增加滞环控制器,亦可达到消除偏磁现象的目的,但是由于电感电流反馈内环的存在,动态响应较之方案 4 会有所下降^[22]。

3 实验结果

图 6 为级联 H 桥型逆变器样机图片,其拓扑结

构与图 4 相同。图 7 为级联 H 桥型逆变器多电平端口电压,本文使用三电平 PSC-PWM 对级联 H 桥逆变器进行调制,其载波频率为 2 kHz,故等效开关频率为 12 kHz^[24],由于是 3 个模块级联,因此输出电压为 7 电平。

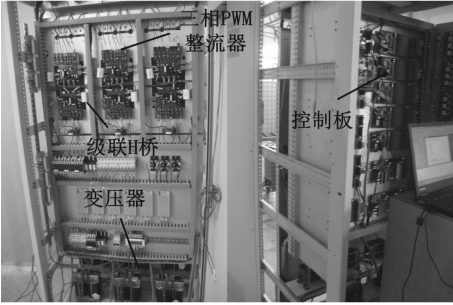


图 6 样机实验平台

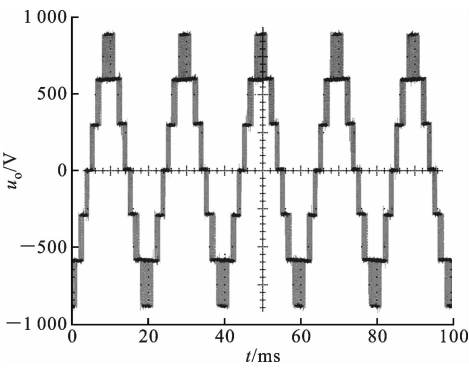


图 7 级联 H 桥型逆变器多电平端口电压(7 电平)

图 8 所示为方案 1 控制下的变压器原边电压和滤波电感电流,可以看出如本文之前所分析,滤波电感电流已经严重畸变,原边电压也发生了略微的振荡,变压器励磁电流比较大,出现了偏磁现象。图 9 为方案 2 控制下的变压器原边电压和滤波电感电流,如前文所分析,电压环的单向积分饱和效应造成了输出电压消顶的现象。图 10 为将方案 2 内环 P 调节器替换为 PI 调节器时,进行动态投切电阻负载的实验结果,可以看出,在合适的参数下,电压消顶现象基本消失,然而由于控制器均已饱和,已经失去了对输出电压的调节能力,输出电压波形已经接近开环控制。图 11 为方案 3 控制下的动态投切电阻负载实验结果,可以看出,虽然偏磁现象得到了抑制,但是系统动态响应并不理想,在突加电阻负载时,需要两个周波以上的调节时间,即 40 ms 以上。图 12 为方案 4 控制下动态投切电阻负载实验结果,可以看出,控制器完全抑制了偏磁,并且投切电阻负载时,电压恢复时间均在 20 ms 以内。

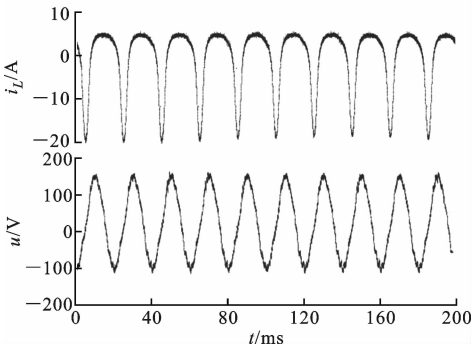


图 8 方案 1 实验结果

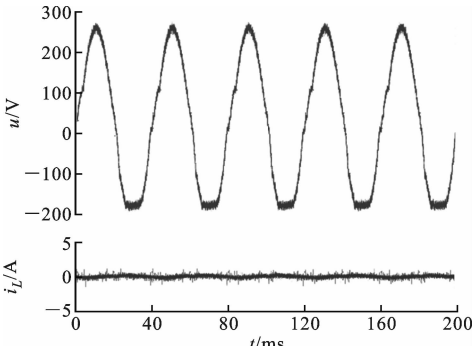
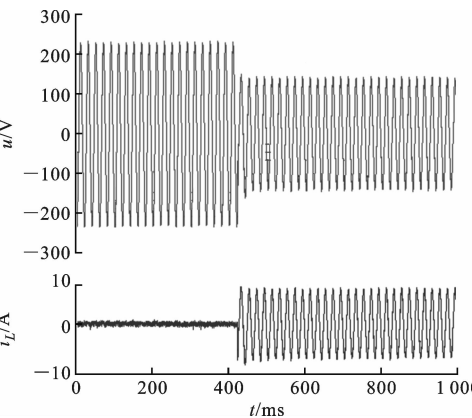
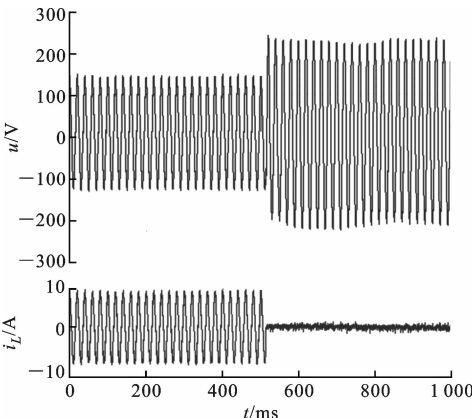


图 9 方案 2 实验结果

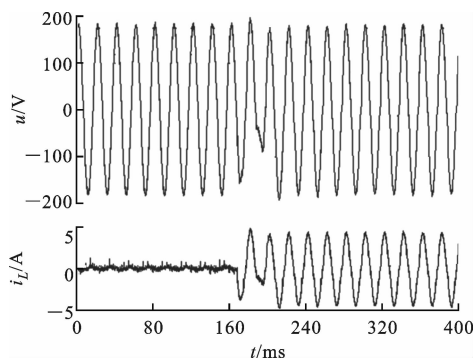


(a) 突加电阻负载

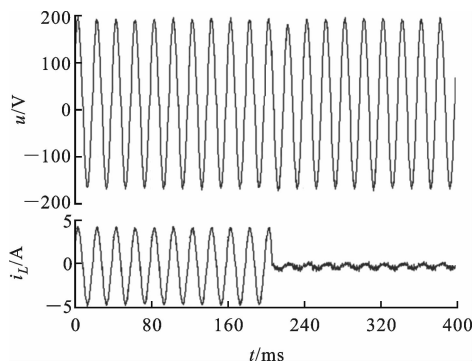


(b) 突减电阻负载

图 10 方案 2 中内环替换为 PI 调节器的动态投切电阻负载实验结果

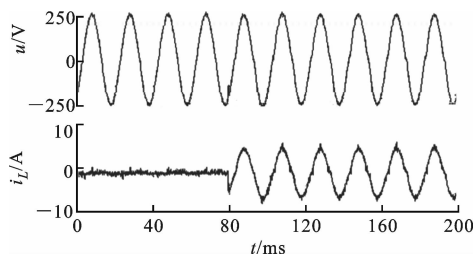


(a) 突加电阻负载

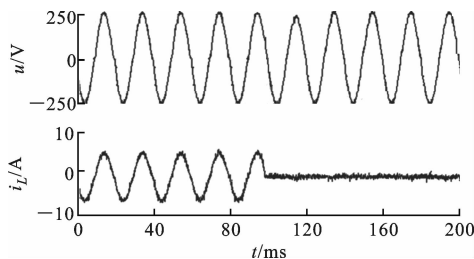


(b) 突减电阻负载

图 11 方案 3 的动态投切电阻负载实验结果



(a) 突加电阻负载



(b) 突减电阻负载

图 12 方案 4 的动态投切电阻负载实验结果

4 结 论

本文研究了变压器偏磁现象的形成机理,得出变压器原边电压和副边电压的直流分量是造成变压器偏磁现象的主要原因的结论,然后提出了几种通过抑制逆变器滤波电感电流中直流分量来消除原边

电压直流分量的控制方案,通过分析和对比,得出的结论如下。

(1)电压电流反馈双闭环控制策略无法有效抑制偏磁现象,在较严重的情况下,变流器电压甚至无法正常建立,因此需要额外的抑制偏磁方法。

(2)电压传感器零漂需要进行校准,通过控制使其越小越好。

(3)双闭环反馈控制辅助以偏磁抑制控制器时,电压环会出现单向饱和现象,若传感器存在零漂,输出电压会有消顶的可能性,若传感器零漂得到校准,消顶现象得到减轻,但是动态响应依然受到限制。

(4)双闭环反馈辅助以偏磁抑制控制器时,内环使用 PI 调节器会失去电压调节能力。

(5)单电压反馈辅助以偏磁抑制控制器的动态响应较快,但是电压环依然有单向饱和的情况。

(6)单电压反馈辅助以滞环控制器和偏磁抑制控制器的动态响应较快,抑制偏磁更加彻底,在投切电阻负载实验中,电压恢复时间在 20 ms 以内。

(7)当双闭环反馈控制内环控制器是 P 调节器时,辅助以滞环控制器和偏磁抑制控制器亦能达到完全抑制偏磁的目的,但其动态响应不如单电压反馈辅助以滞环控制器和偏磁抑制控制。

参考文献:

- [1] PENG F Z, LAI J S. A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static var generation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(5): 1130-1138.
- [2] NABAE A, TAKAHASHI I, AKAGI H. A new neutral-point clamped PWM inverter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1981, 17(5): 518-523.
- [3] 王鸿雁, 邓焰, 赵荣祥. 飞跨电容多电平逆变器开关损耗最小 PWM 方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 51-55.
WANG Hongyan, DENG Yan, ZHAO Rongxiang. Switching loss minimizing PWM method for flying capacitor multilevel inverter [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2004, 24(8): 51-55.
- [4] 姚缨英. 大型电力变压器直流偏磁现象研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2000.
- [5] 佟昕. HVDC 输电引起变压器直流偏磁分析及抑制措施 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2014.
- [6] 蒋伟. UHVDC 输电引起变压器直流偏磁及其抑制措施的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009.

- [7] 董霞. 变压器直流偏磁研究 [D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [8] 郭洁, 黄海, 唐昕. 500 kV 电力变压器偏磁振动分析 [J]. 电网技术, 2012, 36(3): 70-75.
GUO Jie, HUANG Hai, TANG Xin. Analysis on 500 kV power transformer vibration under DC magnetic biasing [J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 70-75.
- [9] 李晓萍, 文习山, 蓝磊. 单相变压器直流偏磁试验与仿真 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 33-40.
LI Xiaoping, WEN Xishan, LAN Lei. Test and simulation for single-phase transformer under DC bias [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(9): 33-40.
- [10] 李泓志, 崔翔, 刘东升. 直流偏磁对三相电力变压器的影响 [J]. 中国电工技术学报, 2010, 25(5): 88-96.
LI Hongzhi, CUI Xiang, LIU Dongsheng. Influence on three-phase power transformer by DC bias excitation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 88-96.
- [11] 赵志刚, 刘福贵, 张俊杰. 直流偏磁条件下变压器励磁电流的实验与分析 [J]. 中国电工技术学报, 2010, 25(4): 71-76.
ZHAO Zhigang, LIU Fugui, ZHANG Junjie. Measurement and analysis of magnetizing current in DC-biased transformers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 71-76.
- [12] 陈国栋, 宋晋峰, 张亮. 动态电压恢复器注入变压器的直流偏磁抑制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4983-4989.
CHENG Guodong, SONG Jinfeng, ZHANG Liang. Control strategy for eliminating DC magnetic flux in the injection transformer of a dynamic voltage restorer [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2014, 34(28): 4983-4989.
- [13] 王大庆, 贲洪奇, 孟涛. 基于死区调节的单极桥式 PFC 变换器变压器偏磁抑制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30): 46-53.
WANG Daqing, BEN Hongqi, MENG Tao. A flux DC bias suppression scheme of single-stage full-bridge PFC converters based on dead zone adjustment [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(30): 46-53.
- [14] 王大庆. 基于全桥结构的单相单级有源功率因数校正关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [15] 朱振东, 翟志军, 许大中. 逆变器中高频变压器偏磁研究 [J]. 电力电子技术, 1997(1): 14-15.
ZHU Zhendong, ZHAI Zhijun, XU Dazhong. Study of the high frequency transformer magnetic biasing in the inverter [J]. Power Electronics, 1997(1): 14-15.
- [16] 黄俊, 王兆安. 电力电子变流技术 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 1993: 8-40.
- [17] LU Jialin, SUN Jin, SU Yanmin. Research on transformer magnetic biasing control method for AC power supplies [J]. System Engineering and Electronics, 2001(4): 17-22.
- [18] 卢家林. IGBT 应用共性技术及大容量高性能逆变电源的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2002.
- [19] ABDEL-RAHIM N M, QUAICOE J E. Analysis and design of a multiple feedback loop control strategy for single-phase voltage-source UPS inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996, 11(4): 532-541.
- [20] BUSO S, FASOLO S, MATTAVELLI P. Uninterruptible power supply multi-loop control employing digital predictive voltage and current regulators [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(6): 1846-1854.
- [21] DONG D, THACKER T, BURGOS R, et al. On zero steady-state error voltage control of single-phase PWM inverters with different load types [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3285-3297.
- [22] LOH P C, NEWMAN M J, ZMOOD D N, et al. A comparative analysis of multiloop voltage regulation strategies for single and three-phase UPS systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(5): 1176-1185.
- [23] TEODORESCU R, LISERRE M, RODRIGUEZ P. Grid converters for photovoltaic and wind power systems [M]. West Sussex, UK: Wiley, 2011: 205-236.
- [24] HOLMES D G, LIPO T A. Pulse width modulation for power converters: principle and practice [M]. Hoboken, New Jersey, USA: Wiley, 2003: 453-530.

(编辑 杜秀杰)