

单相级联 H 桥整流器电压平衡与纹波抑制策略研究

李延帅, 徐传芳*, 宋阳阳, 王艺博

(大连交通大学 自动化与电气工程学院, 辽宁 大连 116052)

Study on Voltage Balance and Ripple Suppression Strategy of Single-Phase Cascade H-bridge Rectifier

LI Yanshuai, XU Chuanfang*, SONG Yangyang, WANG Yibo

(School of Automation and Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116052, China)

Abstract: The main circuit of the traditional single-phase cascade H-bridge rectifier is improved, the power decoupling arm is added, the mathematical model is established, and the voltage balance and ripple suppression strategies are studied. Firstly, the whole loop is controlled by double closed-loop, and the extraction scheme of fundamental signal is optimized by the second-order generalized integration method. Secondly, the power balance relationship of the system is derived, the primary relationship model of the grid-side current and the capacitance voltage squared is established, and the variable proportion link is introduced to effectively improve the robustness of the system to resist parameter changes. Then, the independent Buck-type active power decoupling control strategy is adopted, and the duty cycle of the decoupled bridge arm switch tube is distributed in real time by calculation, and an adaptive frequency selector is designed to separate the secondary ripple signal to realize the suppression of the secondary ripple voltage ripple of the DC bus. Finally, the experimental verification based on Matlab/Simulink software shows that the proposed method can effectively solve the problems of voltage balance and secondary ripple power suppression.

Key words: improved single-phase cascade H-bridge rectifier; dual closed-loop control; squared voltage feedback control; Buck-type active power decoupling control

摘 要: 对传统单相级联 H 桥整流器主电路加以改进, 增加了功率解耦桥臂, 建立了数学模型, 并对电压平衡和纹波抑制策略进行了研究。首先, 整体回路采用双闭环控制, 通过二阶广义积分方法优化了基波信号的提取方案; 其次, 对系统功率平衡关系进行推导, 建立网侧电流和电容电压平方的一次关系模型, 并引入可变比例环节, 有效提升系统抵御参数变化的鲁棒性; 然后, 采用独立式 Buck 型有源功率解耦控制策略, 通过运算实时分配解耦桥臂开关管占空比, 设计自适应选频器分离二次纹波信号, 实现对直流母线二次纹波电压脉动的抑制。最后, 基于 Matlab/Simulink 软件进行试验验证, 所提方法能够有效地解决电压平衡和二次纹波功率抑制问题。

关键词: 改进单相级联 H 桥整流器; 双闭环控制; 平方电压反馈控制; Buck 型有源功率解耦控制

0 引言

单相级联 H 桥整流器作为多电平变换器主要方案之一^[1-3], 因其具有高耐压性、高功率密度性及可多级拓展性等特点, 在高压整流的电力电子传动系统中得到广泛应用^[4-5]。单相级联 H 桥 (Cascade H-bridge Rectifier, CHBR) 控制目标^[6-7]有三个: 保证各级单元输出侧直流电压均衡; 实现输入网侧保持单位因数功率整流; 有效降低谐波干扰, 抑制二倍频纹波功率^[8-9]。

开展对 CHBR 控制策略的探究对于多电平整流器的发展具有重要意义, 文献[10]改进了瞬态电流法, 通过对瞬时有功电流的重新定义, 提升了系统电能质量, 但在面对系统参数变化时, 电容电压动态效能较差。因此, 文献[11]基

基金项目: 辽宁省交通科技项目(202318)

Transportation Science and Technology Project of Liaoning (202318)

于无锁相环瞬态电流策略,将模糊控制技术与附加电压平衡方法相结合,增加电压均衡自适应,提升了 CHBR 的工作稳健性。不足的是,模糊技术的弊端使得 CHBR 控制精度降低。文献[12]设计了一种平方电压反馈^[13]法,通过对功率平衡关系式的定义,取输出电容电压的平方与指令电压的压差设计自适应电压控制器,提高了系统的功率密度和动态响应速度。以上方法虽然在一定程度上改善了 CHBR 系统的动、静态性能,但并没有解决模型所固有的二次电压脉动问题。在实际工况中,系统极易受到二次纹波功率的影响,导致稳定性和功率密度大大降低。文献[14]通过对单相 H 桥整流器主电路拓扑进行改进,能够将直流母线存在的二次脉动功率进行解耦分离。但由于模型设计复杂,开关管较多,不利于后续策略的设计,且能量转换效率较低。文献[15]提出了一种基于 Buck 型有源功率控制方法,通过对第三桥臂占空比进行精确计算,控制解耦桥臂中的能量吸收与释放,进而实现直流母线二次纹波功率的分离。这种复用型的结构可以最大限度减少开关器件的使用,提升功率密度,在调节直流侧电压均衡的同时,实现二次纹波功率抑制,为后续方法的展开提供了一种新的思路^[16-17]。

综合上述文献,为了提升系统动态响应速度、降低网侧电流总谐波畸变率(Total Harmonics Distortion, THD)含量、维持系统最大功率密度运行,本文建立了基于功率解耦的改进型 CHBR 数学模型,对其控制策略进行了设计。以电容电压平方作为偏差调制因子设计了其电压平衡控制算法,建立了网侧电流和电容电压平方的一次关系模型,进一步与独立式 Buck 型有源功率解耦控制策略相结合,同时实现了电压均衡与纹波功率的抑制。最后,以三级联单元 CHBR 模型为例,设计仿真验证了方法的有效性。

1 CHBR 主电路及数学模型

本文在传统 CHBR 主电路基础上加以改进,增加了功率解耦桥臂,并建立了基于独立式 Buck 型有源功率解耦控制的 CHBR 数学模型。该电路能够在抵抗外界非线性干扰的同时,抑制内部低次谐波对输出电容电压所造成的影响,其拓扑

结构如图 1 所示。

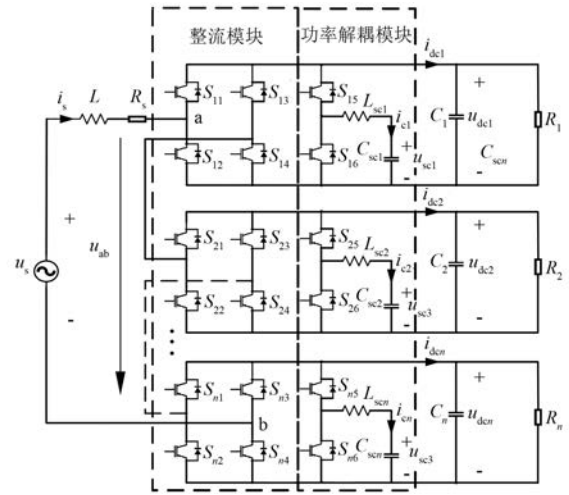


图 1 改进型单相级联 H 桥整流器拓扑结构

Fig. 1 Improved single-phase CHBR topology

图中: u_s 、 i_s 分别为网侧电压、电流; L 、 R_s 分别为网侧输入电感、负载; C_i 、 R_i ($i=1, 2, \dots, n$) 分别为输出电容、负载; u_{abi} 、 u_{dci} 分别为各级联单元交流侧电压、输出侧电容电压。

功率解耦模块通过 Boost 工作状态,将功率解耦模块中的二次纹波能量全部补偿回直流母线中。

分别定义 S_i 、 S_j 为各级联单元整流模块和功率解耦模块通断状态:

$$S_i = \begin{cases} 1, & S_{i1}, S_{i4} \text{ 导通} \\ 0, & S_{i1}, S_{i3} \text{ 导通}, S_{i2}, S_{i4} \text{ 导通} \\ -1, & S_{i2}, S_{i3} \text{ 导通} \end{cases} \quad (1)$$

$$S_j = \begin{cases} 1, & S_{i6} \text{ 关断}, S_{i5} \text{ 导通} \\ 0, & S_{i6} \text{ 导通}, S_{i5} \text{ 关断 / 导通} \\ -1, & S_{i6} \text{ 关断}, S_{i5} \text{ 关断} \end{cases} \quad (2)$$

功率解耦模块由解耦电感 L_{sci} 、电容 C_{sci} 组成,通过在 Buck 和 Boost 两种工作模式中进行切换,实现与直流母线二次纹波功率的双向交互^[15]。

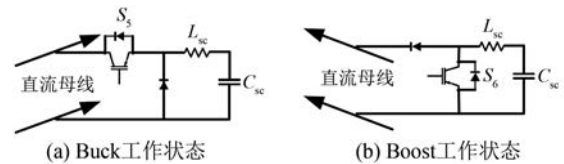


图 2 纹波能量存储模块两种工作状态

Fig. 2 Ripple energy storage module operates in two states

(1) Buck 工作状态: 当 S_{i6} 关断, S_{i5} 导通时,

直流母线对解耦电感和解耦电容进行充电, 功率解耦桥臂电流的上升斜率为

$$\text{Buck up} = \frac{u_{\text{dci}} - u_{\text{sci}}}{L_{\text{sci}}} \quad (3)$$

在 S_{i5} 关断后, 解耦电感继续向解耦电容充电, 功率解耦桥臂电流的下降斜率为

$$\text{Buck down} = \frac{u_{\text{sci}}}{L_{\text{sci}}} \quad (4)$$

功率解耦模块通过 Buck 工作状态, 将直流母线的全部二次纹波能量存储到解耦电容中。

(2) Boost 工作状态: 当 S_{i5} 关断, S_{i6} 导通时, 解耦电容向解耦电感充电, 功率解耦桥臂电流的上升斜率为

$$\text{Boost up} = \frac{u_{\text{sci}}}{L_{\text{sci}}} \quad (5)$$

在 S_{i6} 关断后, 解耦电容和解耦电感同时将能量释放回直流母线上, 功率解耦桥臂电流的下降斜率为

$$\text{Boost down} = \frac{u_{\text{dci}} - u_{\text{sci}}}{L_{\text{sci}}} \quad (6)$$

结合基尔霍夫定律及各开关管的通断状态, 可得 CHBR 数学模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_s}{dt} = u_s - u_{\text{ab}} - R_s i_s \\ C_i \frac{du_{\text{dci}}}{dt} = S_i i_s - \frac{u_{\text{dci}}}{R_i} - S_j C_{\text{sci}} \frac{du_{\text{sci}}}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

进一步, 使用调制因子 $\frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} x(t) dt$ 对式(7)进行平均变换^[18], 以占空比 d_i 、 d_j 代替开关函数 S_i 、 S_j , 即可得平均意义下的 CHBR 数学模型:

$$\begin{cases} L \frac{d\bar{i}_s}{dt} = \bar{u}_s - \sum_{i=1}^n d_i u_{\text{dci}} - R_s \bar{i}_s \\ C_i \frac{d\bar{u}_{\text{dci}}}{dt} = d_i \bar{i}_s - \frac{u_{\text{dci}}}{R_i} - d_j C_{\text{sci}} \frac{d\bar{u}_{\text{sci}}}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

2 CHBR 控制策略

基于文中所建立的 CHBR 数学模型, 本文对其控制策略进行设计。整体控制采用电压电流双闭环方法, 外环采用比例积分 (Proportional Integral, PI) 控制器、内环采用基于二阶广义积分法的 dq 前馈解耦控制, 优化了基波信号的提取^[19]。电压均衡控制采用平方电压反馈控制算

法, 建立网侧电流和电容电压平方的一阶线性模型, 通过引入可变比例环节, 增加系统自调节能力, 提高系统动态效能。纹波抑制控制采用独立式 Buck 型有源功率解耦控制策略, 重新定义功率平衡关系, 设计自适应选频器实现纹波功率与直流母线功率的分离, 可有效抑制二次纹波功率对系统的影响, 降低网侧电流 THD。

2.1 电压平衡控制策略

维持各级联单元的电压均衡是 CHBR 能够保持可靠运行的前提条件, 本文设计了具有一定自调节能力的平方电压反馈控制算法, 其拓扑结构如图 3 所示。

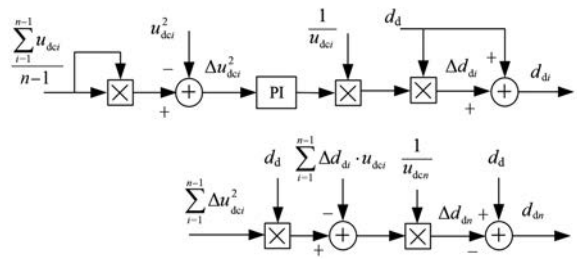


图 3 平方电压反馈控制策略框图

Fig. 3 Block diagram of the square voltage feedback control strategy

CHBR 各级联单元交流侧功率 P_{abi} 、直流侧功率 P_{dci} 及二次纹波功率 P_{sci} 可表示为

$$\begin{cases} P_{\text{abi}} = u_{\text{abi}} i_s \\ P_{\text{dci}} = u_{\text{dci}} i_{\text{dci}} = u_{\text{dci}} C_i \frac{du_{\text{dci}}}{dt} + \frac{u_{\text{dci}}^2}{R_i} \\ P_{\text{sci}} = L_{\text{sci}} \frac{di_{\text{ci}}}{dt} i_{\text{ci}} + u_{\text{dci}} i_{\text{ci}} \end{cases} \quad (9)$$

在忽略系统功率开关损耗的前提下, 功率平衡关系可表示为

$$P_{\text{abi}} = P_{\text{dci}} + P_{\text{sci}} \quad (10)$$

在一个开关周期内, 对于功率解耦桥臂支路来说, 吸收与释放的功率相等, 可近似看作 $P_{\text{sci}} = 0$ 。因此, 式(10)可近似表示为

$$u_{\text{abi}} i_s = u_{\text{dci}} C_i \frac{du_{\text{dci}}}{dt} + \frac{u_{\text{dci}}^2}{R_i} \quad (11)$$

变换后可得 u_{dci} 的一阶动态方程:

$$\frac{du_{\text{dci}}^2}{dt} = \frac{2u_{\text{abi}} i_s}{C_i} - 2 \frac{u_{\text{dci}}^2}{R_i C_i} \quad (12)$$

u_{dci}^2 与网侧电流 i_s 成线性关系, 以电压平方量作为控制量, 能够实现对输出电压的快速整定。

将偏差信号 $u_{dci}^{*2} - u_{dci}^2$ 分解为

$$u_{dci}^{*2} - u_{dci}^2 = (u_{dci}^{*} + u_{dci})(u_{dci}^{*} - u_{dci}) \quad (13)$$

当电容电压瞬时值发生变化时, $(u_{dci}^{*} + u_{dci})$ 也相应的发生变化, PI 控制器中的比例环节随系统的运行状态进行动态调整,生成带有偏差消除信号的调制波 Δd_{di} 。各级联单元的有功占空比可表示为

$$d_{di} = d_d + \Delta d_{di} \quad (14)$$

经调制后的触发信号送至整流模块的各开关管,实现对 CHBR 电容电压均衡控制。考虑整体控制策略和电压平衡控制耦合影响,对最后一个

级联单元的有功占空比进行开环调节,解耦合占空比表达式如式(15)所示:

$$\Delta d_{dn} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (\Delta u_{dci}^2 d_d - \Delta d_{di} u_{dci})}{u_{dci}} \quad (15)$$

2.2 独立式 Buck 型有源功率解耦控制

根据图 1 所示的带有功率解耦桥臂的 CHBR 主电路,在保证系统兼容性和灵活控制能力的基础上,提出基于实时分配解耦桥臂开关管占空比的独立式有源功率解耦控制策略,如图 4 所示。

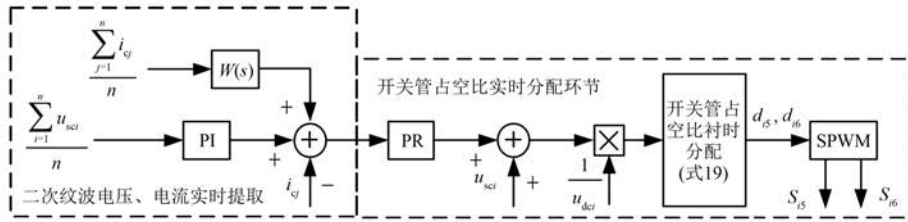


图 4 独立式有源功率解耦控制框图

Fig. 4 Block diagram of independent active power decoupling

CHBR 网侧电压、电流可表示为

$$\begin{cases} u_s = U_s \sin(\omega t) \\ i_s = I_s \sin(\omega t - \varphi) \end{cases} \quad (16)$$

式中: U_s 、 I_s 分别为网侧电压、电流的有效值; ω 为工频角频率。

网侧功率可表示为

$$P_s = u_s \cdot i_s = \frac{U_s \cdot I_s}{2} \cos \varphi - \frac{U_s \cdot I_s}{2} \cos(2\omega t - \varphi) \quad (17)$$

网侧滤波电感 L 作为系统的升压元件,其功率为

$$P_L = i_s \cdot L \frac{di_s}{dt} = \frac{\omega L I_s^2}{2} \sin(2\omega t - 2\varphi) \quad (18)$$

忽略网侧输入负载 R_i , 则交流测输入功率可重新定义为

$$P_{ab}^* = P_s - P_L = \frac{U_s I_s}{2} \cos \varphi \left[\frac{U_s I_s}{2} \cos(2\omega t - \varphi) + \frac{\omega L I_s^2}{2} \sin(2\omega t - 2\varphi) \right] \quad (19)$$

CHBR 输入功率与输出功率相等:

$$P_{ab}^* = \sum_{i=1}^n P_{dci} \quad (20)$$

结合式(19),将输入功率看作是直流部分 P 。

与交流部分 P_r 的叠加,可分别表示为

$$\begin{cases} P_o = \frac{U_s I_s}{2} \cos \varphi \\ P_r = \frac{U_s I_s}{2} \cos(2\omega t - \varphi) + \frac{\omega L I_s^2}{2} \sin(2\omega t - 2\varphi) = \\ \sqrt{\frac{U_s I_s}{2} \cos^2 \varphi + \frac{\omega L I_s^2}{2} \sin(2\omega t - 2\varphi)} \cdot \\ \sin(2\omega t - 2\varphi + \psi) \end{cases} \quad (21)$$

$$\psi = \tan^{-1} \frac{(U_s I_s)/2 \cdot \cos \varphi}{(\omega L I_s^2)/[2 - (U_s I_s)/2 \cdot \sin \varphi]} \quad (22)$$

式(21)中的 P_r 即为需要储存在功率解耦模块的纹波功率项。

该方法开关管占空比的实时分配需要对二次纹波参考电流进行精确给定计算。通过对解耦桥臂二次纹波电压、电流的实时提取,设计自适应选频器^[15],实现对二次纹波功率项分离提取,选频器传递函数可表示为

$$W(s) = \frac{\xi(k\omega)s}{s^2 + \xi(k\omega)s + (k\omega)^2} \quad (23)$$

式中: ξ 为整定系数; k 为选频系数。

综合考虑系统减小电容电压波动范围和二倍

频功率分量的影响,提升电流质量的需求,选取 $k=2$ 最为合适。为了消除电流量稳态误差,将比例谐振(Proportional Resonant, PR)控制器的谐振频率设定为 2ω ,同时将其输出与解耦电容的电压叠加,除以各级直流侧电容电压,计算出在一个开关周期内,功率解耦桥臂分别处于 Buck 和 Boost 工作阶段时的导通占空比,如式 24 所示:

$$\begin{cases} d_{i5} = \sqrt{\frac{2\bar{i}_{ci} \cdot f_s \cdot L_{sci}}{u_{dci} - u_{sci}}} \\ d_{i6} = \sqrt{\frac{2\bar{i}_{ci} \cdot f_s \cdot (u_{dci} - u_{sci})}{u_{sci}}} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $\bar{i}_{ci}$ 为二次纹波电流的均值。

通过对解耦桥臂开关管导通占空比的实时给定,对直流母线的二次纹波功率进行分离,可有效提高单相 CHBR 直流侧输出电压静态性能,降低网侧电流 THD。

3 仿真分析

为了验证本文所提策略的有效性,本文以三级联模块的 CHBR 模型为例进行试验验证,仿真参数如表 1 所示^[20]。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数名称	参数值
网侧电压有效值 u_s/v	150
网侧电压频率 f_s/Hz	50
开关频率 f/kHz	20
网侧滤波电感 L_s/mH	4.5
各单元直流侧电容 $C_i/\mu F$	470
各单元直流侧负载 R_i/Ω	10
直流侧参考电压 u_{dc}^*/V	100
各单元纹波电容 $C_{si}/\mu F$	100
各单元纹波电感 L_{si}/mH	1.2

3.1 系统电压平衡与纹波抑制能力仿真

默认设置纹波抑制模块和电压平衡模块在 0.6 s 前不启动,图 5(a)为网侧电压、电流仿真波形,图 5(b)为直流侧电压仿真波形。

设置 0.5 s 时,电阻 R_1, R_2, R_3 分别切换到 10 $\Omega, 8 \Omega, 6 \Omega$ 。在 0.6 s 启动电压平衡模块,可以看出各单元直流侧电压实现快速均衡,且过程中电压变化平缓,具有良好的动态特性;网侧电流经短暂波动,仍能保持与网侧电压同相位,维持单位

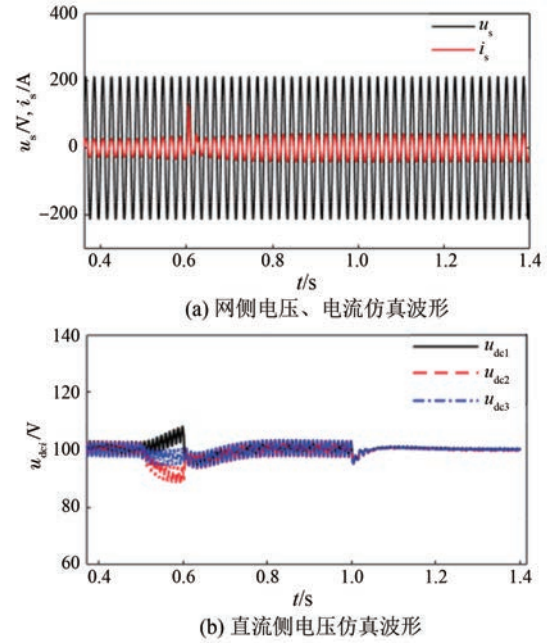


图 5 对电压平衡与纹波抑制模块测试仿真

Fig. 5 Test simulation of the voltage balancing and ripple suppression module

功率因数运行。

在 1 s 时,启动纹波抑制模块,直流侧电压在产生较小的扰动后,迅速恢复平衡且压差被抑制在一个极小的范围,网侧电压电流无畸变信号,系统保持单位因数整流运转。

以第一 H 桥单元为例,其纹波电容电压波形如图 6 所示,可以看出,1 s 后二次纹波能量储存在了功率解耦桥臂。

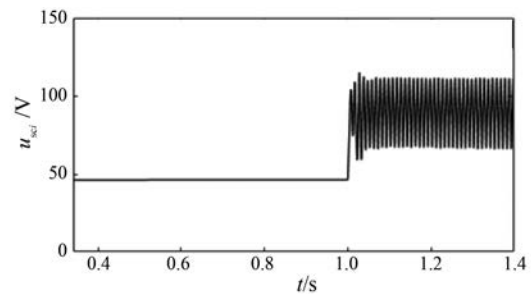


图 6 第一 H 桥单元的纹波电容电压波形

Fig. 6 The ripple capacitor voltage waveform of the first H-bridge unit

图 7(a)为 0.5 s 之前网侧电流频谱图,图 7(b)为 1 s 之后加入电压平衡模块和纹波抑制模块控制的网侧电流频谱图。从图中可以看出,在未加入电压控制模块和纹波抑制模块时,直流侧存在二次纹波电压,造成了网侧电流较高度度的

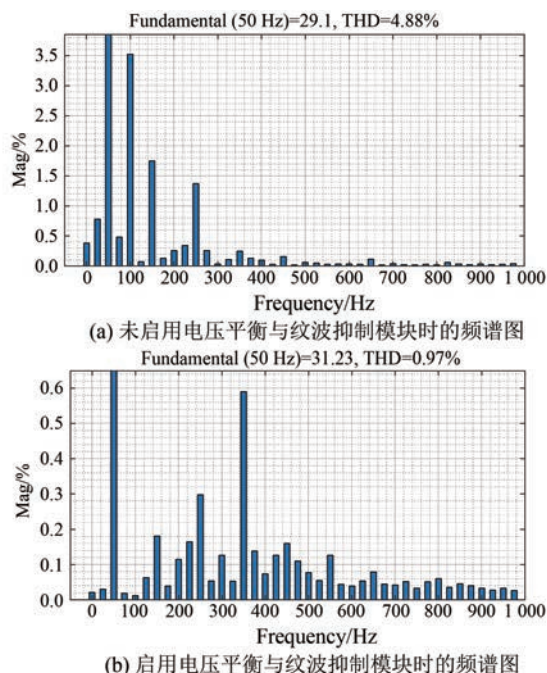


图 7 网侧电流频谱图

Fig. 7 Grid-side current spectrograms

二次纹波畸变, THD 为 4.88%; 在本文所提出的方法调控下, 网侧电流的 THD 下降到 0.97%。证明所提方法具有良好的兼容性, 能够在维持直流侧各单元电压稳定的条件下, 有效实现了对二次纹波功率的抑制, 获得理想的控制性能。

3.2 负载失衡条件下仿真分析

设置模型在 0.5 s 时启用电压平衡模块和纹波抑制模块。图 8(a) 为网侧电压、电流仿真波形, 图 8(b) 为负载时直流侧电压仿真波形。

在 0.8 s 时, 设置电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 分别为 8.5Ω 、 7Ω 、 5.5Ω ; 在 1.2 s 时, 将 R_1 、 R_2 、 R_3 恢复为 10Ω 。由图 8(a) 和图 8(b) 可以看出, 虽然输出负载处于不平衡状态, 但网侧电流能始终与电压相位保持一致, 在负载发生突变时也能够平稳过渡, 正弦化保持良好; 直流侧电容电压具有较快响应时间, 动、静态性能优异。

对负载失衡条件下的网侧电流进行频谱分析, 频谱图如图 9 所示。从图中可以看出, THD 为 1.33%, 网侧电流的直流分量和二次谐波分量抑制效果明显, 与理论分析相符。

4 结语

针对单相级联 H 桥整流器的电压均衡和纹

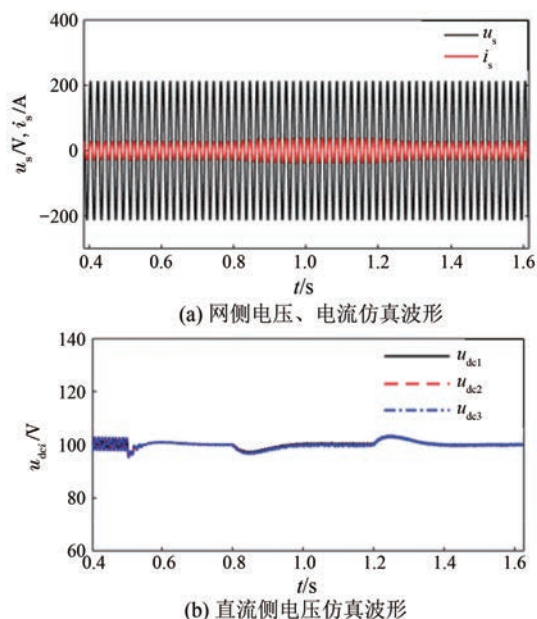


图 8 负载失衡时仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms when the load is out of balance

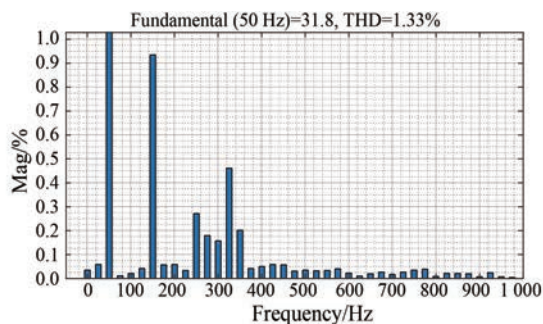


图 9 负载失衡时网侧电流频谱图

Fig. 9 Grid-side current spectrogram when the load is out of balance

波抑制进行了深入研究, 并对所提控制策略进行了仿真验证, 得到如下结论:

(1) 电压平衡控制算法通过对系统功率平衡关系定义, 以直流侧电压平方作为控制信号, 引入可变比例环节, 有效提升了系统抗干扰能力。

(2) 纹波抑制控制策略采用独立式 Buck 有源功率解耦控制, 没有增加系统控制上的复杂性, 通过运算实时分配解耦桥臂开关管占空比, 设计自适应选频器分离二次纹波信号, 使得网侧电流 THD 大大降低, 实现了对网侧电流低次谐波的抑制。

(3) 在系统启动和负载突变时, 所设计的电压均衡策略和纹波抑制策略能够互相配合, 使得

系统在保持高功率密度的情况下,同时具有更好的动态性能。

参考文献

- [1] 朱艺锋, 贾小磊, 周飞杉, 等. 单相五电平整流器无延时功率观测控制方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(7): 156-165.
ZHU Y F, JIA X L, ZHOU F S, et al. No-delay power observation control method for single-phase five-level rectifier [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(7): 156-165.
- [2] 朱艺锋, 赵海龙, 张国澎, 等. 单相五电平整流器滑模模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(8): 2030-2039.
ZHU Y F, ZHAO H L, ZHANG G P, et al. Sliding mode model predictive control of single-phase five-level rectifier [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(8): 2030-2039.
- [3] SARITHA B, JANAKIRAMAN P A. Sinusoidal three-phase current reconstruction and control using a DC-link current sensor and a curve-fitting observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(5): 2657-2664.
- [4] ROSHAN A, BURGOS R, BAISDEN A C, et al. A dq rotating frame controller for single phase full-bridge inverters used in small distributed generation systems [C] // APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Anaheim, CA, 2007.
- [5] 刘林海. 级联 H 桥整流器的控制策略研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.
LIU L H. Research on control strategy of cascaded H-bridge rectifier [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016.
- [6] SHE X, HUANG A Q, ZHAO T, et al. Coupling effect reduction of a voltage-balancing controller in single-phase cascaded multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(8): 3530-3543.
- [7] 崔镜宇, 王静. 基于级联 H 桥整流器的双闭环解耦控制策略研究[J]. 智能计算机与应用, 2022, 12(10): 136-143.
CUI J Y, WANG J. Research on double closed-loop decoupling control strategy based on cascaded H-bridge rectifier [J]. Intelligent Computer and Application, 2022, 12(10): 136-143.
- [8] 张辉, 宋平岗, 连加巍, 等. 基于自抗扰解耦的电力电子牵引变压器整流级直接功率控制[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(1): 54-60.
ZHANG H, SONG P G, LIAN J W, et al. Direct power control of rectifier stage of power electronic traction transformer based on active disturbance rejection decoupling [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(1): 54-60.
- [9] 李鑫海. 级联型电力电子变压器的优化控制策略研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
LI X H. Research on optimal control strategy of cascaded power electronic transformer [D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.
- [10] 丁菊霞, 李群湛. 单相级联 H 桥整流器无锁相环瞬态直接电流控制[J]. 铁道学报, 2019, 41(1): 43-49.
DING J X, LI Q Z. Transient direct current control of single phase cascaded H-bridge rectifier without phase-locked loop [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(1): 43-49.
- [11] 李延帅, 徐传芳, 张宁, 等. 单相级联 H 桥整流器电压平衡控制策略[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(8): 32-37.
LI Y S, XU C F, ZHANG N, et al. Voltage balance control strategy of single-phase cascade H-bridge rectifier [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(8): 32-37.
- [12] 李延帅, 徐传芳, 宋阳阳. 单相级联 H 桥整流器平方电压反馈控制算法[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 117-125.
LI Y S, XU C F, SONG Y Y. Square voltage feedback control algorithm for single-phase cascade H-bridge rectifier [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 117-125.
- [13] 袁义生, 陈旭. 级联 H 桥整流器输出电压平衡控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2020, 54(2): 16-19.
YUAN Y S, CHEN X. Research on cascaded H-bridge rectifier output voltage balance control strategy [J]. Power Electronics, 2020, 54(2): 16-19.
- [14] KREIN P T, BALOG R S, MIRJAFARI M. Minimum energy and capacitance requirements for single-phase inverters and rectifiers using a ripple port [J]. IEEE Transactions on Power

- Electronics, 2012, 27(11): 4690-4698.
- [15] 刘强. 单相级联 H 桥整流器电压均衡与有源功率解耦控制[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- LIU Q. Voltage equalization and active power decoupling control of single-phase cascaded H-bridge rectifier [D]. Ji'nan: Shandong University, 2019.
- [16] 刘铭鑫. 电网不平衡时有源功率解耦型 PWM 整流器控制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- LIU M X. Control strategy for three-phase PWM rectifier with active power decoupling circuit under unbalanced grid voltages [D]. Dalian : Dalian University of Technology, 2020.
- [17] 钊翔坤. 级联 H 桥整流器电压均衡与纹波抑制策略研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- ZHAO X K. Research on voltage equalization and ripple suppression strategy of cascaded H-bridge rectifier [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [18] 陶兴华, 李永东, 孙敏. 一种 H 桥级联型 PWM 整流器的直流母线电压平衡控制新方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 85-90.
- TAO X H, LI Y D, SUN M. A novel DC-link voltages balancing control method for cascaded H-bridge rectifier [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 85-90.
- [19] 顾长彬. 无变压器轨道交通传动系统级联 H 桥有源前端控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- GU C B. Research on the control strategy of CHBR based on transformerless traction drive system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [20] 袁义生, 陈旭, 兰梦罗. 级联 H 桥整流器输出电压平衡模糊 PI 控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(11): 116-122.
- YUAN Y S, CHEN X, LAN M L. Fuzzy PI control strategy for output voltage balance of cascaded H-bridge rectifier [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electric Power Systems and Automation, 2020, 32(11): 116-122.

收稿日期:2024-03-14

收到修改稿日期:2024-05-07

作者简介:

李延帅(1997—),男,硕士研究生,研究方向为电力电子变压器技术,812970867@qq.com;

* 通信作者:徐传芳(1978—),女,博士,副教授,研究方向为电力牵引与传动控制系统、列车运行控制,xuchuanfang@126.com。

Study on Voltage Balance and Ripple Suppression Strategy of Single-Phase Cascade H-bridge Rectifier

LI Yanshuai, XU Chuanfang*, SONG Yangyang, WANG Yibo

(School of Automation and Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116052, China)

Key words: improved single-phase cascade H-bridge rectifier; double closed-loop control; square voltage feedback control; Buck-type active power decoupling control

As one of the main schemes of multi-level converter, single-phase cascade H-bridge rectifier (CHBR) has been widely used in high-voltage rectified power electronic drive system because of its high voltage resistance, high power density, and multi-stage scalability. There are three control objectives of CHBR: firstly, to ensure that the DC voltage on the output side of the unit at all levels is balanced; secondly, the unit factor power rectification is maintained on the input network side; thirdly, it can effectively reduce harmonic interference and suppress the double-frequency ripple power.

Based on the above control objectives, in order to improve the dynamic response speed of the system, reduce the total harmonics distortion (THD) content of the current on the grid side, and maintain the maximum power density of the system, an improved CHBR mathematical model based on power decoupling is established, and the circuit topology and control strategy are analyzed separately. The voltage equalization control algorithm uses the capacitor voltage square as the deviation modulation factor, a one-time relationship model of the grid-side current and the capacitor voltage square is established, and combines it with the independent Buck-type active power decoupling control strategy to realize the voltage equalization and ripple power suppression at the same time. Finally, taking the three-level element CHBR model as an example, the effectiveness of the method is verified by design simulation.

In this paper, the traditional CHBR main

circuit is improved, the power decoupling bridge arm is added, and a CHBR mathematical model based on independent Buck-type active power decoupling control is established, which can resist the external nonlinear interference while suppressing the influence of internal low-order harmonics on the output capacitance voltage.

For the mathematical model of CHBR, the control strategy is designed in this paper. The overall control adopts the voltage and current double closed-loop method, the outer loop adopts the proportional integral controller, and the inner loop adopts the dq feedforward decoupling control based on the second-order generalized integration method, which optimizes the extraction of fundamental signals.

The voltage equalization control adopts the square voltage feedback control algorithm, the first-order linear model of the grid side current and capacitance voltage squared is established, and the self-adjustment ability of the system is increased and the dynamic efficiency of the system by introducing the variable proportional link is improved.

The ripple suppression control adopts an independent buck active power decoupling control strategy, the power balance relationship is redefined, and an adaptive frequency selector to realize the separation of ripple power and DC bus power is designed, which effectively suppresses the influence of secondary ripple power on the system and reduces the current THD on the grid side.

