

电力电子牵引变压器中的单相PWM整流器控制策略的研究

许 恺¹, 李彦辉¹, 陈骥群¹, 赵星云²

(1. 国网河北省电力公司保定供电分公司, 河北 保定 071051, 2. 国网天津市电力公司检修公司, 天津 300010)

摘要: 铁路牵引电网作为电力机车的动力来源, 其安全稳定运行对铁路企业提高企业形象和社会信誉具有重要意义。然而, 随着大量非线性负荷接入电网, 导致电网谐波含量增加, 运行经济性降低。电力电子变压器 (Power Electronic Transformer, PET) 具有功率因数可调、动态响应较快及抑制电网侧电流谐波的特点, 用于牵引电网可有效提高电网电能质量, 有利于电网经济运行。首先介绍了电力电子变压器单元拓扑与单相PWM整流器的结构, 分析了整流器在传统PI控制策略下的不足, 并基于谐波补偿算法为整流器提出了一种改进控制策略。最后通过仿真分析与实验结果, 验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 牵引电网; 电力电子牵引变压器; 单相PWM整流器; 谐波补偿算法

Research on control strategy of single-phase PWM rectifier in power electronic traction transformer

XU Kai¹, LI Yanhui¹, CHEN Jiqun¹, ZHAO Xingyun²

(1. Baoding Electric Power Bureau of Hebei Electric Power Company, Baoding 071051, China;

2. Maintenance Company of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China)

Abstract: As the power source of electric locomotive, the safe and stable operation of railway traction power grid is of great significance for railway enterprises to improve their corporate image and social reputation. However, with a large number of non-linear loads connected to the power grid, the harmonic content of the power grid increases and the operation economy decreases. Power Electronic Transformer (PET) has the characteristics of adjustable power factor, fast dynamic response and suppression of harmonic currents on the grid side. It can effectively improve the power quality of the traction power grid and benefit the economic operation of the grid. Firstly, the topology of power electronic transformer and the structure of single-phase PWM rectifier are introduced, the shortcomings of the rectifier under the traditional PI control strategy are analyzed, and an improved control strategy for the rectifier based on harmonic compensation algorithm is proposed. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy is verified by simulation analysis and experimental results.

Key words: traction power grid; power electronic traction transformer; single-phase PWM rectifier; harmonic compensation algorithm

0 引言

电力电子变压器 (Power Electronic

Transformer, PET), 也称作柔性变压器。它是近年来随着大功率电力电子技术的发展而逐步发展起来的新型电力变压器。它在实现常规电力变

压器电压等级变换、电气隔离和能量传递等基本功能的基础上,还可以实现潮流控制、电能质量控制等许多额外功能^[1-3]。作为一种新型的能量转换设备,与传统的变压器相比,电力电子变压器具有体积小、重量轻、功率因数可调和抑制电网侧电流谐波等优点^[4]。用于牵引电网避免了传统工频牵引变压器重量大、谐波污染和效率低的缺点,提高了系统的功率密度,改善了电网的电能质量,有利于电网经济运行。

作为电力电子牵引变压器(PETT)的重要组成部分,单相PWM整流器具有功率因数可调、四象限运行等诸多优点^[5-6]。然而,由于单相PWM整流器的瞬时输入功率中的低频分量产生的低次谐波会对牵引电网造成“谐波污染”,使得电网电能质量降低,不利于其经济运行。为解决这一问题,文献[7]采用了PI控制算法,PI控制具有算法简单和可靠性高的特点,然而常规的PI控制只能对直流分量进行无差调节,对交流分量难以进行无差跟踪。文献[8]采用了比例谐振(PR)控制算法,PR控制可对交流信号进行有效跟踪,并实现对特定频率交流信号的无差调节,具有较好的谐波抑制能力,可提高系统的动态性能^[9],但该控制策略未进行功率的解耦,无法实现功率因数的调节。

本文首先介绍了电力电子变压器单元拓扑与单相PWM整流器的结构,分析了整流器在传统PI控制策略下的不足,并基于谐波补偿算法为整流器提出了一种改进控制策略,在实现功率解耦控制的前提下,抑制电网侧电流谐波。最后,通过搭建仿真模型和实验电路进行分析,结果表明所提控制策略可实现对电网谐波的有效抑制,使系统获得良好的动态性能。

1 PETT单元与单相整流器结构

图1为电力电子牵引变压器单元拓扑结构图^[10]。单相PWM整流器作为电力电子牵引变压器重要组成部分,其电路图如图2所示。其中, u_{grid} 为电网侧电压; u_{AB} 为VSR交流输入电压;VT与VD分别为主开关管和其对应的反并联二极管

管; R 为VSR的等效电阻与线路等效电阻之和,其值很小,可忽略; L 为交流滤波电感; C_d 为直流滤波电容; R_L 为直流电阻负载。

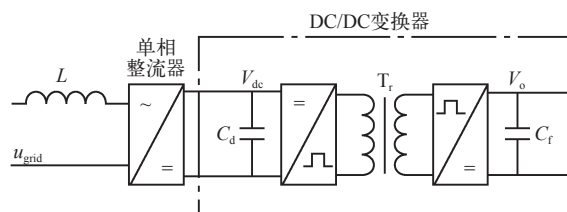


图1 电力电子牵引变压器单元拓扑结构图

Fig. 1 Unit topology structure diagram of power electronic traction transformer

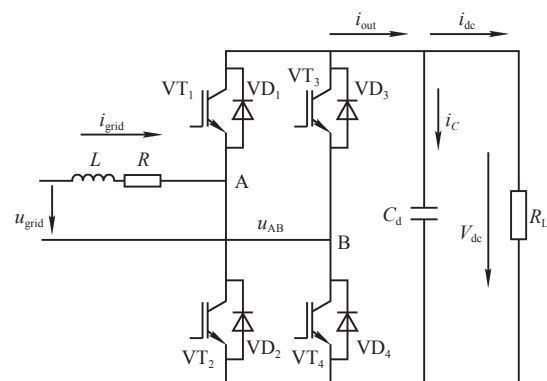


图2 单相整流器电路图

Fig. 2 Circuit diagram of single-phase rectifier

2 单相 PWM 整流器控制策略

2.1 PI控制

单相PWM整流器采用直接电流控制^[11],其基本控制图如图3所示。

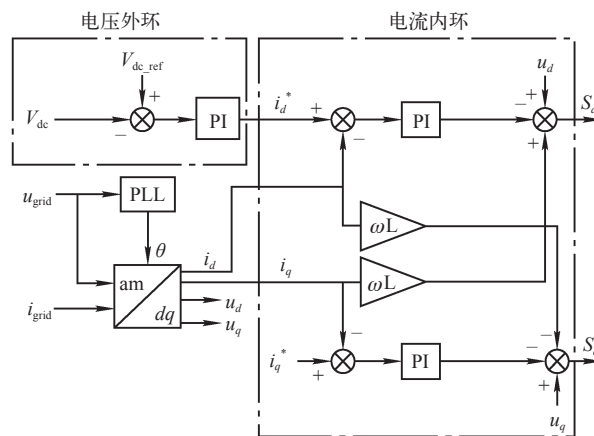


图3 PETT整流器的控制框图

Fig. 3 Control block diagram of PETT rectifier

直接电流控制为双环控制，外环为电压控制环。 V_{dc_ref} 为直流电压参考值，与直流电压实际值 V_{dc} 相比较，经过电压控制器的调节，其输出作为有功电流参考值 i_d^* 。电压控制器采用PI控制器，以实现直流电压信号的无差调节。

内环为电流控制环。电网电流 i_{grid} 通过单相 dq 变换转换成有功电流 i_d 和无功电流 i_q ，实现了交流分量向直流分量的变换。电流控制器采用PI控制器，对直流分量进行调节，实现了功率的解耦及功率因数的可控。通常，为使电网运行在单位功率因数下，可将无功电流参考值 i_q^* 设定为0。

2.2 谐波分析

通过上述分析可知，直接电流控制实现了功率的解耦控制及系统功率因数的可控。然而，电网侧电流存在奇次谐波，其中以3次谐波为主。将3次谐波电流分量代入单相 dq 变换矩阵^[12]，即

$$\begin{bmatrix} i_{d3} \\ i_{q3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta & -\cos\theta \\ \cos\theta & \sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a3} \sin 3\theta \\ I_{a3} \sin 3(\theta - \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

解式(1)可得

$$i_{d3} = -I_{a3} \cos 4\theta = -I_{a3} \cos 4\omega t \quad (2)$$

$$i_{q3} = I_{a3} \sin 4\theta = I_{a3} \sin 4\omega t \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可知，3次谐波分量经过单相 dq 变换后转换为4倍频分量，即4次谐波。低次谐波的存在，使电网的电能质量降低，不利于电网经济运行。为抑制低次谐波，提高系统对交流分量的动态响应能力，下面将基于比例谐振(PR)控制原理，提出一种基于谐波补偿算法的电流环控制策略。

2.3 谐波补偿

与传统PI控制相比，比例谐振(PR)控制可实现对特定频率交流分量的无差调节，提高系统的动态响应能力^[13]。

下面对比了比例积分控制(PI控制)与比例谐振控制(PR控制)的基本性能，并基于PR控制原理，在电流内环PI控制的基础上增加谐波补偿，以减小电网侧电流谐波。

PI控制的传递函数^[14]为

$$G_k = K_p + K_i \frac{1}{s} \quad (4)$$

PR控制的传递函数为

$$G_k = K_p + K_R \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (5)$$

式中， K_p 为比例参数； K_i 为积分参数； K_R 为谐振参数； ω_0 为谐振角频率。

根据式(4)、式(5)分别得出PI控制与PR控制的伯德图，如图4所示。从图4中可知，PI控制只可实现对直流分量的无差调节，PR控制可对特定频率 ω_0 下的交流分量进行无差调节。本文主要对电网电流 i_{grid} 通过 dq 变换后产生的4倍频分量进行补偿，以减小电网侧电流谐波。

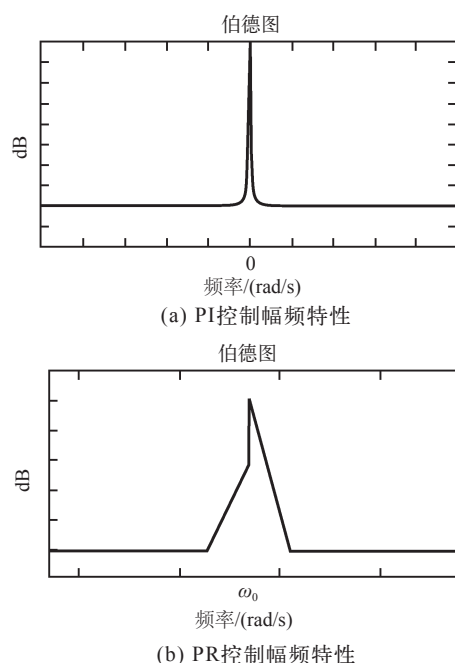


图4 PI控制与PR控制幅频特性比较

Fig. 4 Comparison of amplitude-frequency characteristics between PI control and PR control

2.4 稳定性分析

由文献[15]可得电流内环控制器闭环传递函数为

$$i_L = \frac{KG_i(s)}{sL + KG_i(s)} i_{ref} + \frac{u_{grid}}{sL + KG_i(s)} \quad (6)$$

由式(6)得到系统的特征方程为

$$sL + KG_i(s) = 0 \quad (7)$$

将式(4)、式(5)代入式(7),并分别绘制系统根轨迹分布图,如图5所示。从图5中可知,谐波补偿后的系统极点比PI控制时的极点更靠近虚轴的左侧,说明引入谐波补偿后,系统稳定性得到了较大提升。

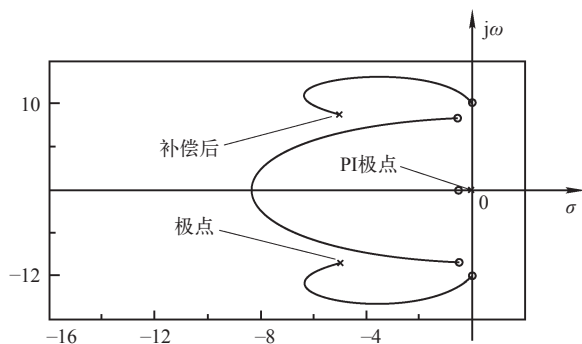


图5 系统根轨迹

Fig. 5 Root locus for the system

2.5 基于谐波补偿的电流环控制策略

通过上述分析可知,变换后的电流谐波分量主要为偶数次谐波,因为PR控制可对特定频率的交流分量进行无差调节,故可基于PR控制原理对特定次谐波加以抑制,其电流环控制器传递函数为

$$G_i(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + \sum_{n=4,6,\dots} K_{pn} + \frac{K_{Rn}s}{s^2 + (n\omega_o)^2} \quad (8)$$

考虑到不同次谐波下控制器之间带宽的相互影响,通常只对系统影响较大的4、6次谐波进行补偿。最终,得到电流环控制器传递函数为

$$G_k(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + \frac{K_{R4}s}{s^2 + (4\omega_o)^2} + \frac{K_{R6}s}{s^2 + (6\omega_o)^2} \quad (9)$$

电流环控制器结构如图6所示。

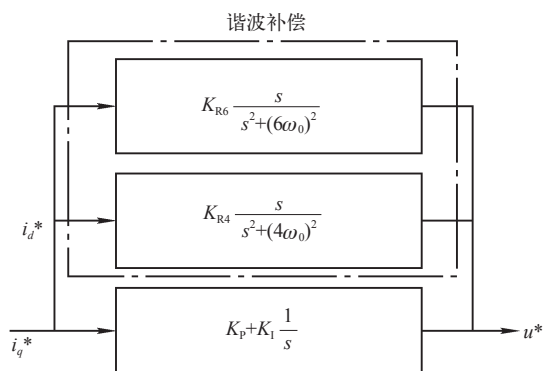


图6 电流环控制器结构图

Fig. 6 Structure Diagram of current loop controller

改进后的PETT整流器的控制框图如图7所示。

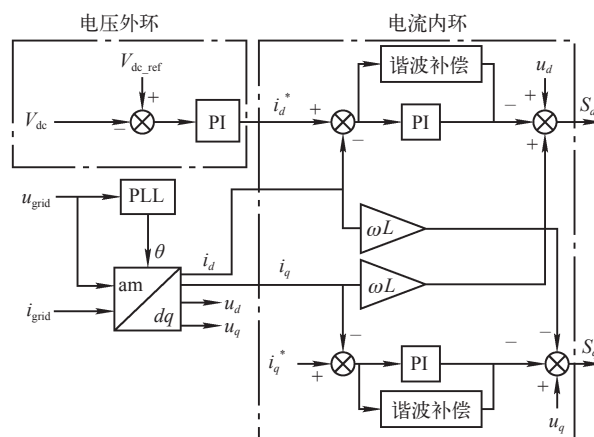


图7 改进后的PETT整流器的控制框图

Fig. 7 Control block diagram of an improved PETT rectifier

3 仿真分析

3.1 仿真参数

为进一步验证上述分析与研究的正确性,下面根据图2搭建仿真模型并进行分析,仿真参数如表1所示。

表1 仿真参数

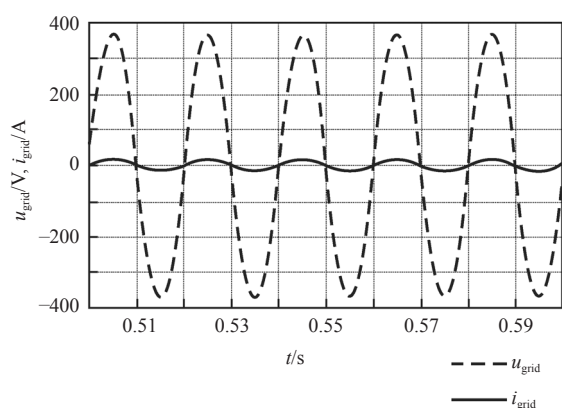
Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值
电网电压有效值 U_{grid}/V	417
电网电压频率 f/Hz	50
交流滤波电感 L/mH	8
直流滤波电容 C_d/mF	1
负载 R_L/Ω	80
直流电压参考值 V_{dc_ref}/V	500

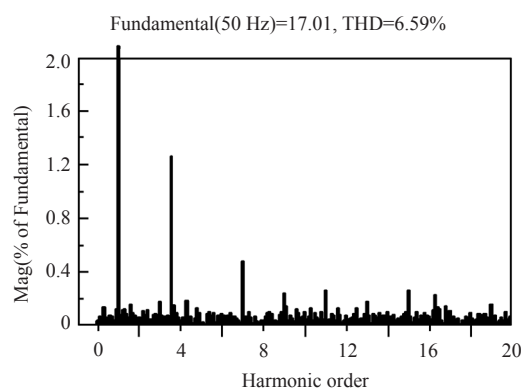
3.2 仿真结果

图8为电流内环采用PI控制时的仿真结果。从图8中可知,电网侧电压与电流相位一致,实现了单位功率因数控制。但电网侧电流波形的“毛刺”较多,经FFT分析可知,THD=6.59%。

图9为d轴和q轴电流仿真结果。从图9中可知,经过单相dq变换后的d轴和q轴电流波形波动较大。通过FFT分析可知,电网侧电流的4倍频分量较大,与理论分析一致。



(a) 电网侧电压电流波形

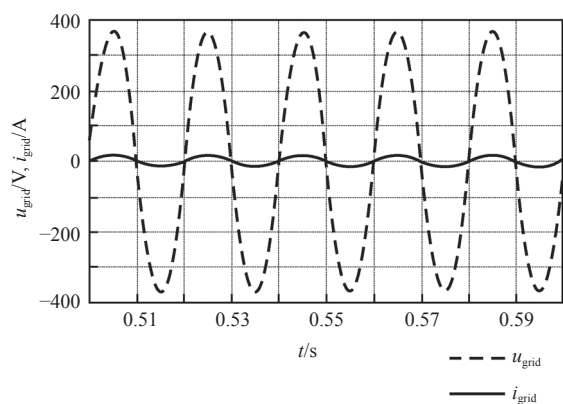


(b) FFT分析结果

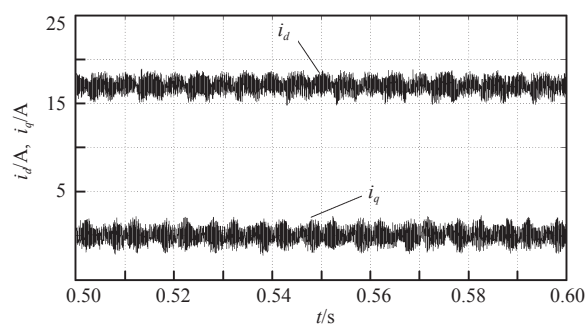
图8 内环采用PI控制时的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of PI control in inner loop

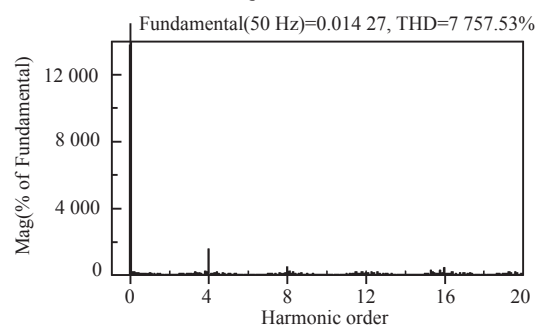
图10为电流内环增加谐波补偿后的仿真结果。从图10中可知，电网侧电流变得更加平滑。经FFT分析可知，THD=4.44%，低于IEEE定义的电谐波总畸变率小于5%的标准，输入交流电流波形基本接近于标准正弦波。仿真结果说明增加谐波补偿后，有效抑制了电网侧电流谐波。



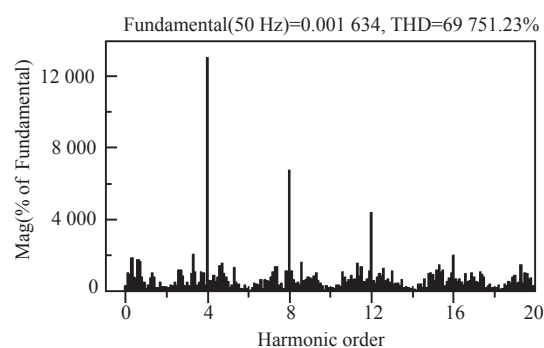
(a) 电网侧电压电流波形



(a) d轴与q轴电流仿真波形



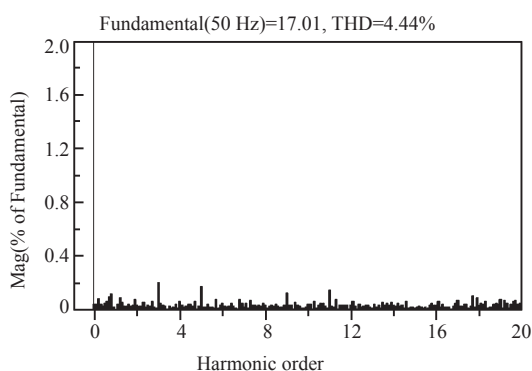
(b) d轴电流FFT分析结果



(c) q轴电流FFT分析结果

图9 d轴与q轴电流仿真结果

Fig. 9 Simulation results of d-axis and q-axis currents

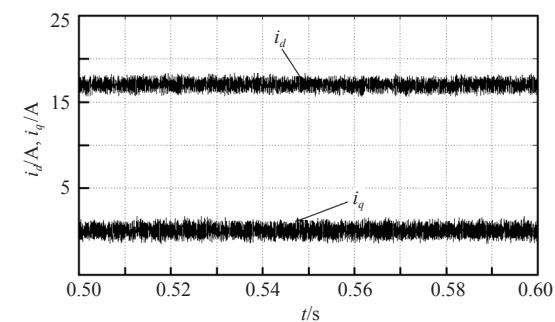


(b) FFT分析结果

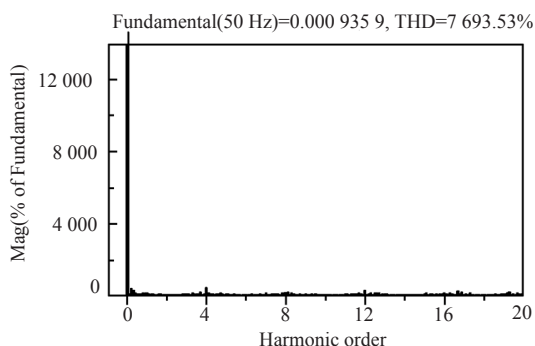
图10 增加谐波补偿后的仿真结果

Fig. 10 Simulation results after adding harmonic compensation

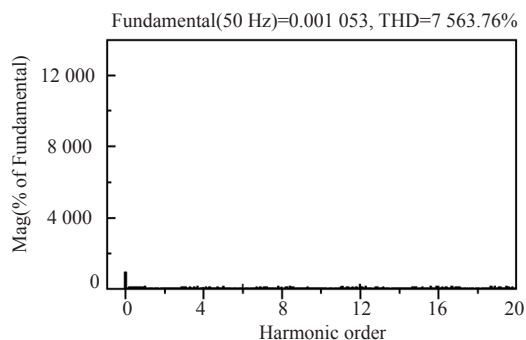
图11为增加谐波补偿后 d 轴和 q 轴电流仿真结果。通过与图9对比可知,谐波补偿后, d 轴和 q 轴电流波形比补偿前更加稳定;经FFT分析可知,4次谐波得到有效抑制。



(a) d 轴与 q 轴电流仿真波形



(b) d 轴电流FFT分析结果



(c) q 轴电流FFT分析结果

图 11 增加谐波补偿后 d 轴与 q 轴电流仿真结果

Fig. 11 The simulation results of d -axis and q -axis current after adding harmonic compensation

图12为直流电压仿真结果。从图12中可知,输出电压稳定在500 V,直流电压达到了系统所设定的参考值。

为进一步验证所提控制策略动态响应特性,下面进行整流器动态特性仿真,分别对比两种控制策略下整流器起动特性和负荷投切特性,图13

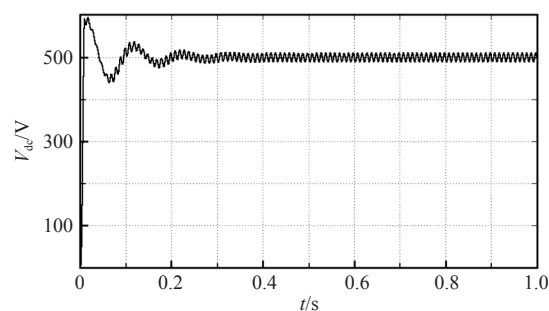
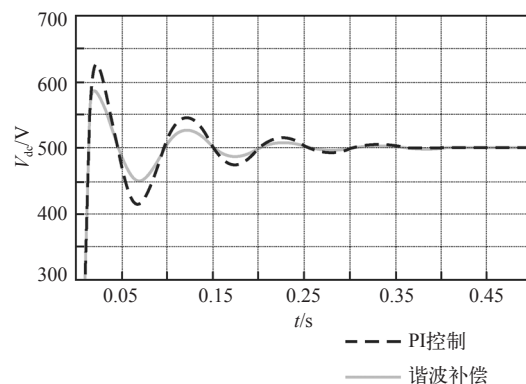


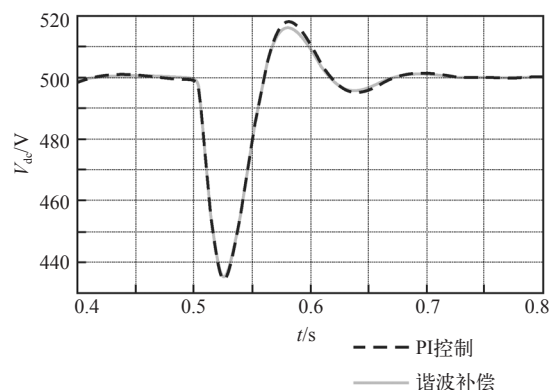
图 12 直流电压仿真结果

Fig. 12 DC voltage simulation results

为仿真结果。通过对比可知,采用谐波补偿后整流器拥有更好的动态响应特性,电压波动幅度及达到稳态所需时间均小于PI控制,系统稳定性得到大幅提高。



(a) 起动特性仿真结果



(b) 负荷投切特性仿真结果

图 13 动态特性仿真结果

Fig. 13 Simulation results of dynamic characteristics

4 实验验证

4.1 实验参数

为进一步验证所提控制策略的有效性,下面

按照图2所示拓扑结构搭建实验电路。相关实验参数如表2所示。

表2 实验参数

Tab. 2 Experimental parameters

参数	数值
输入网侧工频电压 U_{grid}/V	52
直流电压参考值 V_{dc_ref}/V	100
交流滤波电感 L/mH	8
输入直流滤波电容 $C_1/\mu F$	380
直流负载电阻 R_l/Ω	50

4.2 实验结果

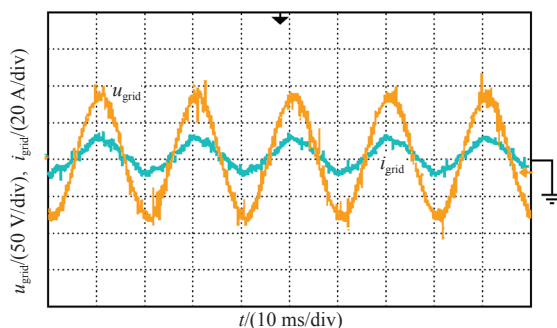
图14为实验结果，通过对比图14a、b可知，电网侧电压与电流相位一致，均实现了单位功率因数控制。但PI控制时电网电流 i_{grid} 谐波较多，电流波形畸变较严重，总谐波畸变率（THD）高达6.3%。补偿后电网侧电流 i_{grid} 波形更接近于正弦，谐波得到了有效抑制，总谐波畸变率（THD）降至3.2%。说明本文所提出的控制策略对电网侧电流谐波有较好的抑制作用。

图14c为输出直流电压实验波形图。从中可知，直流电压实际值达到系统所设定的参考值，但存在较大的2倍频脉动，通常通过增设直流滤波电容加以抑制。

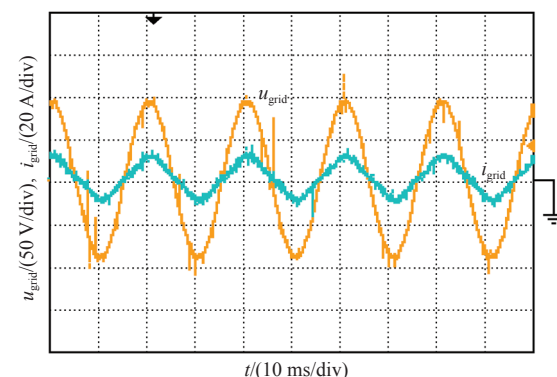
5 结束语

本文首先介绍了电力电子变压器单元拓扑与单相PWM整流器的结构，分析了整流器在传统PI控制策略下的不足，并对PI控制与PR控制特性进行对比研究。然后，基于PR控制对特定频率交流信号良好的跟踪控制能力，为电力电子牵引变压器单相PWM整流器提出了一种新的控制策略，将谐波补偿算法引入电流控制环节。最后，通过搭建仿真模型和实验电路，对所提控制策略进行验证，仿真分析与实验结果均表明：

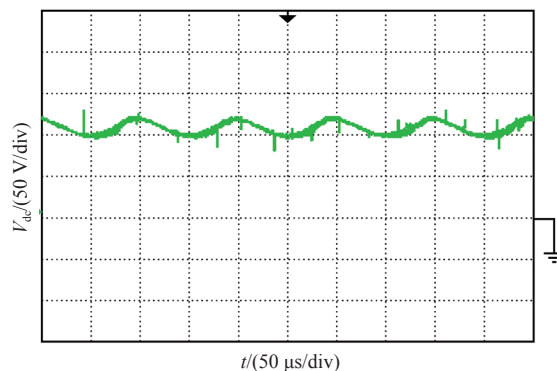
1) 所提控制策略在实现单相整流器功率解耦控制的前提下，有效抑制了电流谐波，提高了牵引电网的电能质量，有利于电网经济运行。



(a) PI控制时电网侧电压电流波形



(b) 谐波补偿后电网侧电压电流波形



(c) 直流电压波形

图14 实验结果

Fig. 14 Experimental results

2) 所提控制策略可使系统获得良好的动态特性，提高了牵引电网的稳定性与可靠性，对保证机车安全运行及提高铁路企业信誉与社会形象具有重要意义。

参考文献

- [1] LI H, ZHANG K, ZHAO H, et al. Active power decoupling for high-power single-phase PWM rectifier[J]. IEEE Transactions on Power

- Electronics, 2013, 28(3): 1308-1319.
- [2] 邓磊, 刘敏, 应丽云, 等. 不同充电模式下电动汽车充电站的仿真与谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 87-95.
- [3] DUJIC Drazen, ZHAO Chuanlong, et al, Power electronic traction transformer-low voltage prototyper[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5522-5534.
- [4] ALEPUZ S, GONZALEZ F, MARTIN-ARNEDO J, et al. Solid state transformer with low-voltage ride-through and current unbalance management capabilities[C]. IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013: 1278-1283.
- [5] 王满商, 李正明, 汪洋. 考虑电动汽车不确定性因素的配电网分布式电源优化布置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 67-72.
- [6] 程杉, 吴思源, 孙伟斌. 考虑电压稳定性和充电服务质量的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 12-21.
- [7] WANG Dan, MAO Chengxiong, LU Jiming, et al. Electronic power transformer to secure the power supply of a mission critical microgrid[C]. 2014 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2014: 5-9.
- [8] 王丹, 毛承雄, 陆继明. 基于电子电力变压器的自平衡牵引变压器[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 176-181.
- [9] YANG Yunhu, ZHOU Keliang, CHENG Ming, et al. Phase compensation resonant control scheme for single phase PWM converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 65-71.
- [10] 李威, 王建骥, 冉启文, 等. 一种新的电力系统暂态波形检测方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(5): 45-48.
- [11] TEODORESCU R, BLAABJERG F, LISERRE M, et al. Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2006, 153(5): 750-762.
- [12] 郭小强, 邬伟扬, 赵清林, 等. 三相并网逆变器比例复数积分电流控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(15): 8-14.
- [13] 朱俊杰, 马伟明, 聂子玲. 一种用于静止式中频电源的比例谐振控制策略[J]. 电机与控制学报, 2012(10): 79-85, 94.
- [14] ZHAO T F, WANG G Y, BHATTACHARYA S, et al. Voltage and power balance control for a cascaded H-bridge converter-based solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1523-1532.
- [15] 徐恒山, 付超, 石新春. 轻型动车牵引电力电子变压器的研究[J]. 华北电力大学学报, 2014, 41(5): 18-22, 61.

作者简介



许 恺

许恺(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为轻型动车牵引电子电力变压器。

(收稿日期: 2020-6-28) **EA**