

本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

杨波, 汤峻, 杨晨.
基于虚拟阻抗的两级式逆变器二次
纹波电流传播特性及抑制策略.
电机与控制应用, 2021, 48(10): 103.




数据监测
多维数据采集, 全面运行分析
全景可视窗口, 丰富报表类型


预测运维
海量行业数据, 精准趋势预测
生命周期管理, 性能尽在掌握


故障诊断
专业机理模型, 自动故障告警
在线智能诊断, 高效便捷派单


绿色节能
环保绿色先行, 助力低碳生产
节能降耗减排, 合理降本增效


聚汇商机
供需多方互联, 协同合作共赢
有效整合资源, 共享生态未来

SEARI
上电科

上海电器科学研究所(集团)有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司

云平台技术支持: 18918675776
固定电话: 021- 52669993

业务垂询: 18801608667
地址: 上海市普陀区武宁路505号9号楼



微信扫码关注我们

基于虚拟阻抗的两级式逆变器二次纹波 电流传播特性及抑制策略^{*}

杨 波, 汤 峻, 杨 晨

(国网江苏省电力有限公司苏州供电分公司, 江苏 苏州 215031)

摘 要: 两级式单相逆变器的输出瞬时功率包含 2 倍于输出电压频率的脉动功率, 致使前级 DC/DC 变换器的输入存在二次纹波电流。前级 DC/DC 变换器控制环路的优化是解决该问题有效且低成本的方法。通过环路等效, 给出了单环控制以及双环控制的等效电路模型, 基于虚拟阻抗的概念分析了电压外环以及电流内环在二次纹波电流传递过程中的作用。在此基础上, 解释并归纳了现有控制策略的抑制原理, 指出其中存在的局限性, 并给出了 2 种优化方案。最后, 构建了 1.5 kVA 两级式单相逆变器原理样机进行了仿真及试验验证, 验证了分析方法的可行性以及控制策略优化的有效性。

关键词: 两级式单相逆变器; 二次纹波; 等效电路模型; 虚拟阻抗; 优化方案

中图分类号: TM 464 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)10-0103-07

doi: 10.12177/emca.2021.102

Analysis of the Second-Order Harmonic Current in Two-Stage Inverter Based on Virtual Impedance^{*}

YANG Bo, TANG Jun, YANG Chen

(Suzhou Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suzhou 215031, China)

Abstract: The instantaneous output power of the two-stage single-phase inverter contains the pulsating power whose frequency is twice as much as the output voltage frequency. For this reason, the secondary ripple current exists in the input of the front-stage DC/DC converter. The control loop optimization of the pre-stage DC/DC converter is an effective and low-cost method to solve this problem. The equivalent circuit models of single loop control and double loop control are given through loop equivalence. Based on the concept of virtual impedance, the functions of voltage outer loop and current inner loop in secondary ripple current transfer process are analyzed. On this basis, the suppression principles of the conventional control strategies are explained and summarized, the limitations of existing control strategies are pointed out, and two optimization schemes are given. Finally, a 1.5 kVA two-stage single-phase inverter prototype is built for simulation and experimental verification, which verifies the feasibility of the analysis method and the effectiveness of the control strategy optimization.

Key words: two-stage single-phase inverter; second harmonic current (SHC); equivalent circuit model; virtual impedance; optimization method

0 引 言

在分布式交流发电系统中^[1-3], 通常需要采

用前级 DC/DC 变换器+后级单相 DC/AC 变换器的两级式功率变换拓扑, 其中前级 DC/DC 变换器实现对输入低压直流的升压以及高频电气隔离,

收稿日期: 2021-06-04; 收到修改稿日期: 2021-09-15

^{*} 基金项目: 国网总部科技项目(524608180194)

作者简介: 杨 波(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为柔性直流配网工程建设及管理。

后级 DC/AC 变换器对输入直流电压进行逆变控制,实现对终端负载供电或者并网。

由于变流器输入输出瞬时功率守恒,故两级式单相逆变器输出瞬时功率势必存在系统输出交流频率 2 倍的脉动信号,进而使得前级 DC/DC 变换器输入直流电流中存在同样 2 倍输出频率的交流纹波。该二次纹波电流一方面增加了逆变器开关管及磁性元器件损耗;另一方面将会对输入源造成干扰,影响输入电源的性能,对光伏电池、燃料电池等分布式新能源的寿命也有重大影响^[4-8]。

文献[9]通过优化前级 DC/DC 变换器电压外环和电流内环的截止频率,实现了对二次纹波电流的抑制,分别给出了开环、单电压闭环、电压电感电流双环控制下的环路控制参数设计方法,但文中并未详细阐述电压环、电感电流对负载侧二次纹波电流传播的作用机理。文献[10]通过反向电流传递增益对此进行解释,但该方法较为复杂且不够直观。文献[11]针对单电压环控制的 DC/DC 变换器,引入电感电流带通反馈环路,并利用虚拟电阻的概念解释了其抑制二次纹波的原理。文献[12-13]针对双环控制的 DC/DC 变换器,于电压环输出引入一带阻滤波器,有效地抑制了二次纹波,但也未详细解释其抑制机理。

本文分析两级式单相逆变器中二次纹波的产生原因以及组成,指出抑制前级 DC/DC 变换器滤波电感电流二次纹波对于抑制输入电流二次纹波中的重要作用。针对前级 DC/DC 变换器滤波电感电流二次纹波,从虚拟阻抗的角度分析了电压外环与电感电流内环在二次纹波的传播过程中的作用,并直观地解释了现有文献中从环路角度抑制电感电流二次纹波的原理,指出了其局限性并给出了优化的方案。文章最后给出的仿真及试验结果验证了环路分析的正确性。

1 两级式单相逆变器前级输入电流二次纹波组成分析

为了便于分析,本文忽略输入源内阻以及输入 EMI 滤波器对二次纹波传播的影响,将输入看作是一个理想电压源。为了研究两级式单相逆变器二次纹波的传播特性以及输入低频纹波电流的大小,并对图 1(a)所示的两级式单相逆变器架构

进行简化,即将后级 DC/AC 变换器及负载等效为一个 2 倍频的交流电源 i_{2nd} 和直流电源 I_{dc} 的并联结构,如图 1(b)所示。

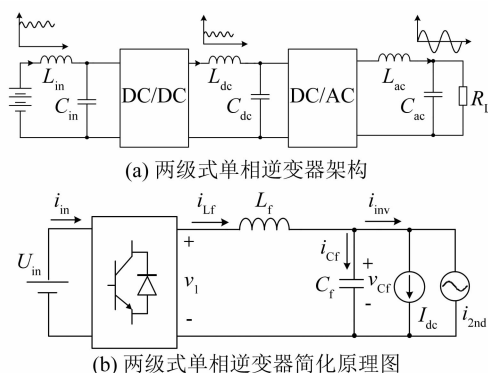


图 1 两级式单相连接器架构及简化原理

其中, V_{in} 为输入直流电压; L_f 与 C_f (直流母线电容) 构成前级 DC/DC 变换器输出低通滤波器, n 为 Buck 类 DC/DC 变换器中变压器原副匝比。低通滤波器前端电压 v_1 , 滤波电感电流 i_{Lf} , 滤波电容电压 v_{Cf} , 滤波电容电流 i_{Cf} , DC/DC 变换器输入电流 i_{in} , 后级逆变器的输入电流 i_{inv} , 以及 DC/DC 变换器的占空比 d 均由各自的低频脉动分量和直流稳态分量组成(忽略高频纹波), 故有:

$$\begin{cases} v_1 = V_1 + \tilde{v}_1 \\ i_{Lf} = I_{Lf} + \tilde{i}_{Lf} \\ v_{Cf} = V_{dc} + \tilde{v}_{Cf} \\ i_{Cf} = \tilde{i}_{Cf} \\ i_{in} = I_{in} + \tilde{i}_{in} \\ i_{inv} = I_{dc} + \tilde{i}_{2nd} \\ d = D + \tilde{d} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\tilde{v}_1$ 、 $\tilde{i}_{Lf}$ 、 $\tilde{v}_{Cf}$ 、 $\tilde{i}_{Cf}$ 、 $\tilde{i}_{in}$ 为脉动分量; V_1 、 I_{Lf} 、 V_{dc} 、 I_{in} 、 D 为直流分量。

根据 Buck 类变换器的输入输出关系有:

$$\begin{cases} v_1 = ndV_{in} \\ i_{in} = ndi_{Lf} \end{cases} \quad (2)$$

考虑到占空比 d 、 i_{Lf} 中存在二次纹波脉动,忽略(2)式中的四次分量,分离二次脉动分量可得:

$$\begin{cases} \tilde{v}_1 = n\tilde{d}V_{in} \\ \tilde{i}_{in} = n(\tilde{d}I_{Lf} + D\tilde{i}_{Lf}) \end{cases} \quad (3)$$

据此,可得简化开关网络后的交流等效模型,如图 2 所示。

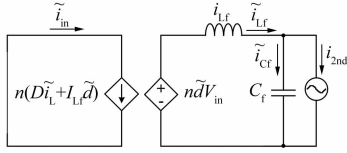


图2 两级式单相逆变器交流等效电路模型

可见,输入端二次纹波电流由2部分脉动组成:占空比的脉动 $\tilde{d}$ 以及滤波电感电流的脉动 $\tilde{i}_{Lf}$ 。在一般情况下,直流母线侧滤波电容 C_f 较大,会使得 $\tilde{d}$ 幅值较小,此时 $\tilde{i}_{Lf}$ 是造成输入电流脉动的主要原因。因而抑制 $\tilde{i}_{Lf}$ 对于抑制输入电流二次纹波具有重要的意义。此外,有效地抑制 $\tilde{i}_{Lf}$ 能有减小滤波电感中的铁耗,有利于效率的提高。

2 二次纹波电流传播特性分析

2.1 二次纹波反向传播增益

为分析二次纹波电流的传播特性,需研究控制环路的加入对其传播增益的影响。在下文分析中,前级 DC/DC 变换器均以 Buck 变换器为例。

对于 Buck 变换器,其工作在开环、单电压环、以及电压电感电流双环控制模式下的系统控制框图分别如图 3(a)~图 3(c) 所示。

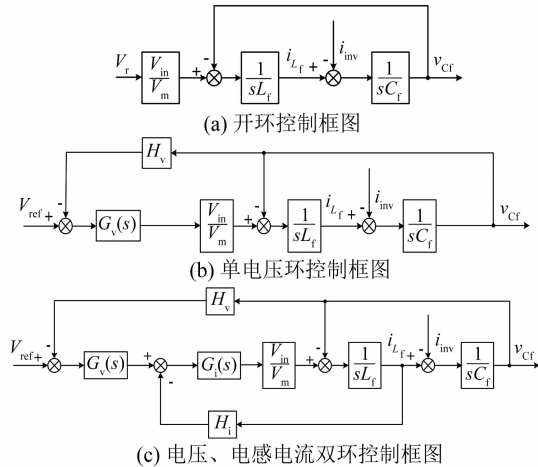


图3 Buck 变换器控制框图

其中, v_r 、 $1/V_m$ 、 H_v 、 $G_v(s)$ 、 H_i 、 $G_i(s)$ 分别为调制信号、调制比、电压反馈系数、电压调节器传递函数、电流反馈系数、电流调节器传递函数。

根据梅森公式可分别写出只在负载端二次纹波电流 i_{2nd} (即 $i_{inv} = i_{2nd}$) 的作用下,3 种控制框图

中电感电流二次纹波分别为

$$\tilde{i}_{Lf,0} = \frac{1}{s^2 L_f C_f + 1} i_{2nd} \quad (4)$$

$$\tilde{i}_{Lf,1} = \frac{1 + H_v G_v(s) V_{in}/V_m}{H_v G_v(s) V_{in}/V_m + s^2 L_f C_f + 1} i_{2nd} \quad (5)$$

$$\tilde{i}_{Lf,2} = -\frac{L_v(s) + L_{LC}(s)}{1 - L_v(s) - L_i(s) - L_{LC}(s)} i_{2nd} \quad (6)$$

式中: $L_v(s)$ 、 $L_i(s)$ 、 $L_{LC}(s)$ 分别为双环控制时的电压外环、电感电流内环、以及 LC 滤波环路的增益。

$L_v(s)$ 、 $L_i(s)$ 、 $L_{LC}(s)$ 的表达式为

$$L_v(s) = -\frac{H_v G_v(s) G_i(s) V_{in}}{V_m L_f C_f s^2} \quad (7)$$

$$L_i(s) = -\frac{H_i G_i(s) V_{in}}{V_m L_f s} \quad (8)$$

$$L_{LC}(s) = -\frac{1}{L_f C_f s^2} \quad (9)$$

2.2 二次纹波传播等效电路

虚拟阻抗的概念在并网逆变器 LCL 滤波器研究中已被广泛采纳^[14-16],本文基于虚拟阻抗分析以及对变换器控制框图的电路原理等效,直观地分析和描述二次纹波电流的传播特性。

对于开环系统,根据其控制框图 3(a) 便可画出其等效电路如图 4 所示。可以看出,滤波电感与滤波电容并联分流来承担二次脉动电流,其分流的比例完全取决于滤波电感与滤波电容的大小。

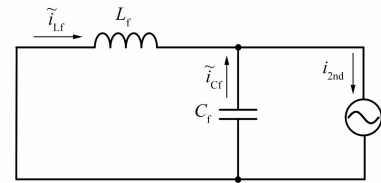


图4 开环系统二次纹波传播等效电路图

根据等效电路图 5 可得到滤波电感二次纹波电流的表达式为

$$\tilde{i}_{Lf,0} = \frac{1/(sC_f)}{sL_f + 1/(sC_f)} i_{2nd} = \frac{1}{s^2 L_f C_f + 1} i_{2nd} \quad (10)$$

可见,由等效电路所获得的纹波电流结果与式(4)相同。

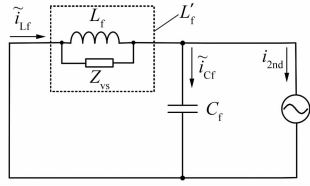


图5 单电压环控制等效电路

同理, 针对图 3(b) 所示的单闭环控制的 Buck 电路控制框图, 同样可以得到所对应的二次纹波传播等效电路图, 如图 5 所示, 此时, 电压反馈支路就相当于一个虚拟阻抗 Z_{vs} , 并联在滤波电感两端, 其中:

$$\frac{1}{Z_{vs}} = H_v G_v(s) V_{in}/V_m \cdot \frac{1}{sL_f} \quad (11)$$

对于一个闭环的开关电源系统, 电压调节器通常采用 PI 控制器, 其表达式如下:

$$G_v(s) = k_{pv} + \frac{k_{iv}}{s} \quad (12)$$

式中: k_{pv} 、 k_{iv} 分别为电压调节器比例系数和积分系数。

将其代入(11)式, 可得:

$$\frac{1}{Z_{vs}} = \frac{1}{\frac{V_m L_f}{H_v k_{pv} V_{in}} s} + \frac{1}{\frac{V_m L_f}{H_v k_{iv} V_{in}} s^2} = \frac{1}{Z_{vs1}} + \frac{1}{Z_{vs2}} \quad (13)$$

可以看出, Z_{vs} 由 Z_{vs1} 与 Z_{vs2} 并联而成, Z_{vs1} 可等效为一个虚拟电感, 而 Z_{vs2} 为二次微分项, 在二次纹波频率处可等效为一个负电阻, 两者皆使得电感支路的阻抗减小。此外, 虚拟阻抗随着电压调节器的比例、积分系数 k_{pv} 、 k_{iv} 的增大而减小, 说明单电压环的引入会使电感支路将承担更多的纹波电流。

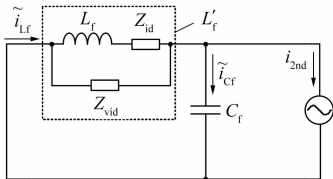


图6 电压电流双环控制等效电路

针对图 3(c) 所示的电压、电感电流双闭环控制的 Buck 电路控制框图, 若只考虑二次纹波, 则

同理得到对应的交流等效电路模型, 如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 电流环的存在, 等效于在电感支路上串联了一个虚拟阻抗 Z_{id} , 而电压、电流环的共同作用, 等效于在电感支路上并联了一个虚拟阻抗 Z_{vid} , 其中:

$$Z_{id} = \frac{V_{in}}{V_m} H_i G_i(s) \quad (14)$$

$$\frac{1}{Z_{vid}} = \frac{V_{in}}{V_m} G_v(s) G_i(s) H_v \cdot \frac{1/(sL_f)}{1 + \frac{V_{in} H_i G_i(s)}{sL_f V_m}} \quad (15)$$

依然考虑电流调节器采用 PI 控制器的形式, 将其代入式(15)可得:

$$Z_{id} = \frac{V_{in} H_i k_{pi}}{V_m} + \frac{V_{in} H_i k_{ii}}{V_m s} = Z_{id1} + Z_{id2} \quad (16)$$

式中: k_{pi} 、 k_{ii} 分别为电流调节器比例系数和积分系数。式(16)表明虚拟阻抗 Z_{id} 由 Z_{id1} 与 Z_{id2} 串联而成, Z_{id1} 可等效为一个虚拟电阻, Z_{id2} 可等效为一个虚拟电容。 Z_{id1} 的引入会增加电感支路的阻抗, 且该值与电流调节器比例系数 k_{pi} 呈正线性关系。电流调节器积分系数 k_{ii} 从 0 增加时, 起初会减小电感支路阻抗, 直至虚拟电容 Z_{id2} 与滤波电感在二次频率处谐振, 此时:

$$\frac{V_{in} H_i k_{ii}}{V_m \omega_{2nd} j} + L_f \omega_{2nd} j = 0 \quad (17)$$

k_{ii} 值为

$$k_{ii} = \frac{V_m L_f \omega_{2nd}^2}{V_{in} H_i} \quad (18)$$

而后随着 k_{ii} 增加, 电感支路的阻抗又会继续增加。

若电压、电流调节器均采用 PI 的形式, 式(15)可简化为

$$Z_{vid} = \frac{V_m L_f}{V_{in} H_v} \cdot \frac{1}{\frac{1}{s} + \frac{1}{s^2} + \frac{1}{s^3}} + \frac{1}{\frac{k_{pv} k_{pi}}{k_{pv} k_{ii} + k_{iv} k_{pi}} + \frac{1}{k_{iv} k_{ii}}} = Z_{vid1} + Z_{vid2} \quad (19)$$

式(19)表明, Z_{vid} 由虚拟阻抗 Z_{vid1} 与 Z_{vid2} 串

电流双环)。

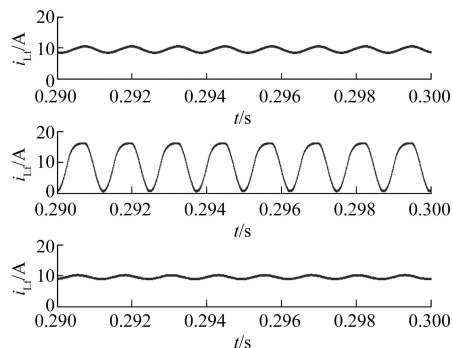


图8 开环、单环、双环直直变换器电感电流波形

图8仿真波形显示,与开环控制相比,单电压环控制的引入明显增加了电感电流的二次纹波,而电流环的引入使电感电流二次纹波得到了较好的抑制。

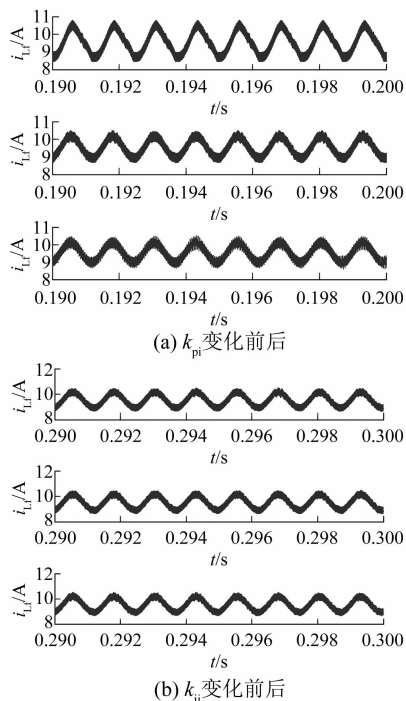


图9 电压电流双闭环电感电流波形

在电压电流双环控制方式下,图9(a)从上到下给出了电流环调节器比例系数 k_{pi} 分别为 0.1、1、10 时的电感电流波形图,比较前 2 个波形可发现, k_{pi} 增大后抑制效果有所提高,比较后两者可发现, k_{pi} 进一步增大后抑制效果几乎不变,这说明 k_{pi} 大到一定程度,抑制效果受限,图9(b)给出了当电流环调节器积分系数 k_{ii} 分别为 0.1、10、

1 000 时的波形,可以发现其脉动抑制效果几乎不变,这说明抑制效果对 k_{ii} 不敏感。

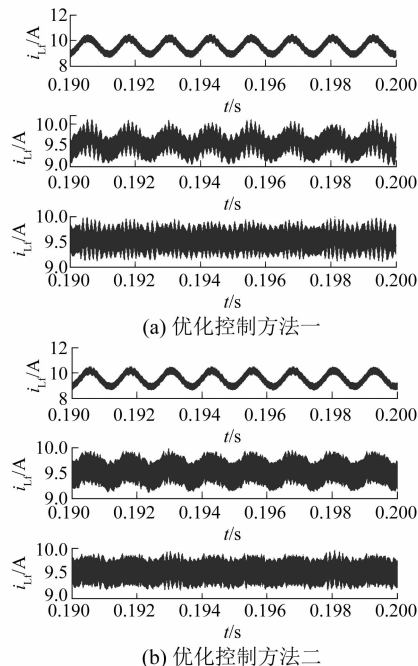


图10 2种优化控制策略下的系统仿真波形

图10(a)、图10(b)分别给出了本文所提出的2种优化控制方法下的前级DC/DC变换器电感电流波形,从中可以看出,在2种优化后的控制策略下,前级DC/DC变换器输入电感电流纹波电流均得到了明显的抑制。

3.3 系统试验验证

图11进一步给出了采用第一种优化控制方法前后的电路试验波形对比。试验波形表明,优化控制方案后,输入电流与电感电流二次纹波电流脉动分量被有效抑制和滤除,脉动分量抑制幅值达到85%以上,该方式对于延长输入直流电源的使用寿命具有明显的积极作用。

4 结 语

本文对前级为 Buck 类 DC/DC 变换器的两级式单相逆变器中二次纹波电流的传播特性进行研究。首先基于等效模型,分析了输入二次纹波电流的来源以及组成,并指出滤波电感电流中的二次纹波电流是造成输入电流产生低频脉动的主要原因。鉴于此,本文给出了负载侧到电感电流二次纹波电流的增益表达式,并对控制框图进行了

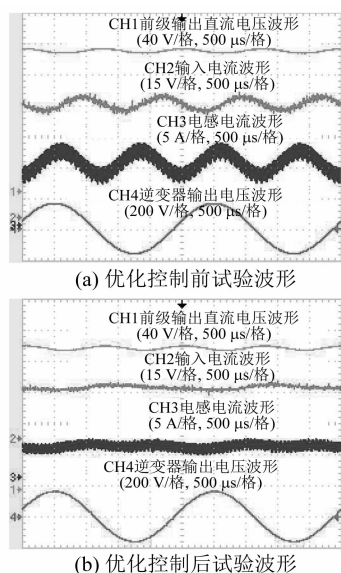


图 11 系统试验波形

等效变换,将控制环路等效为虚拟阻抗,给出了开环、单电压环、电压电流双环控制的 Buck 变换器的等效电路。在此基础上,解释并归纳了现有文献提出的抑制电感电流二次纹波的控制方法,指出了其中存在的局限性,给出了优化方案,并将抑制电感电流脉动的方法归结为,减小电压控制器或反馈系数二次纹波频率处的增益 k_{pv} 、 k_{iv} 、 H_v ; 增大电流调节器或反馈系数二次纹波频率处的增益 k_{pi} 、 k_{ii} 、 H_i 。

最后通过仿真验证了等效电路分析的正确性以及优化方案的有效性。本文对于两级式逆变器的电感电流二次纹波抑制策略的理解及进一步的研究具有一定的参考价值。

【参考文献】

- [1] 吴屏. 燃料电池发电系统前端 DC/DC 变换器设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [2] 张方华, 龚春英. 高效率模块化航空静止变流器的研制[J]. 航空学报, 2009, 30(6): 1119.
- [3] 王赞, 肖岚, 严仰光. 基于燃料电池的推挽正激变换器的控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(33): 82.
- [4] GEMMEN R S. Analysis for the effect of inverter ripple current on fuel cell operating condition[J]. Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(3): 576.
- [5] 朱成花, 石健将, 严仰光. 带有前级 DC/DC 变换器与逆变器相互作用分析[J]. 南京航空航天大学学

报, 2004, 36(5): 574.

- [6] FONTES G, TURPIN C, SAISSET R, et al. Interactions between fuel cells and power converters influence of current harmonics on a fuel cell stack [C] // 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 04CH37551), 2004.
- [7] SCHENCK M E, LAI J, STANTON K. Fuel cell and power conditioning system interactions [C] // Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005.
- [8] FUKUSHIMA K, NORIGOE I, SHOYAMA M, et al. Input current-ripple consideration for the pulse-link DC-AC converter for fuel cells by small series LC circuit [C] // 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009.
- [9] ITOH J, HAYASHI F. Ripple current reduction of a fuel cell for a single-phase isolated converter using a DC active filter with a center tap [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(3): 550.
- [10] 李红波, 张凯, 赵晖. 高功率密度单相逆变器的直流有源滤波器研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 40.
- [11] WANG R, WANG F, BOROEYEVICH D, et al. A high power density single-phase PWM rectifier with active ripple energy storage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(5): 1430.
- [12] WAI R, LIN C. Dual active low-frequency ripple control for clean-energy power-conditioning mechanism [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(11): 5172.
- [13] LIU C, LAI J. Low frequency current ripple reduction technique with active control in a fuel cell power system with inverter load [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1429.
- [14] 王建华, 卢旭倩, 张方华, 等. 两级式单相逆变器输入电流低频纹波分析及抑制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 10.
- [15] 邓翔, 韦微, 龚春英, 等. 一种新颖的抑制两级式直交逆变器输入电流低频脉动的方法 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(30): 24.
- [16] 鲍陈磊, 阮新波, 王学华, 等. 基于 PI 调节器和电容电流反馈有源阻尼的 LCL 型并网逆变器闭环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 133.