

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191601

氢燃料电池并入微电网的改进虚拟同步机控制

徐靖, 赵霞, 罗映红

(兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 近年来, 氢燃料电池等新能源并入微电网得到了人们广泛的关注。提出一种采用虚拟同步机技术的氢燃料电池发电系统。首先建立了氢燃料电池数学模型, 分析了其电压输出特性和功率特性。在此基础上设计了两级变流器式并网控制系统。在虚拟同步机控制中, 针对功率外环中一阶滤波器低频特性影响系统稳定性和动态性能的问题, 在原有滤波器的基础上引入陷波滤波器进行优化补偿。最后, 利用 Matlab/Simulink 进行仿真, 对比优化前后滤波效果, 并对网侧电压、电流总畸变(THD)进行仿真测试, 验证了优化后的滤波器及控制系统的有效性和可行性。

关键词: 虚拟同步机; 氢燃料电池; 微电网; 总谐波畸变率; 陷波滤波器

Improved virtual synchronous generator control for hydrogen fuel cell integration into a microgrid

XU Jing, ZHAO Xia, LUO Yinghong

(College of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In recent years, new energy sources such as the hydrogen fuel cell have attracted considerable attention. This paper presents a hydrogen fuel cell power generation system controlled by a virtual synchronous generator. First, the mathematical model of a hydrogen fuel cell is established, and its voltage output characteristics and power characteristics are analyzed. On this basis, a two-stage converter-type grid connected control system is designed. In the control of a virtual synchronous generator, in order to solve the problem that the low frequency characteristic of the first-order filter in the power outer loop affects the stability and dynamic performance of the system, a notch filter is introduced to optimize the compensation based on the original filter. Finally, Matlab/Simulink is used to simulate and compare the filter effect before and after optimization, and the simulation test of side voltage and THD is carried out. This shows the validity and feasibility of the optimized filter and control system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51767015) and Natural Science Foundation of Gansu Province (No. 2016GS07210).

Key words: virtual synchronous generator; hydrogen fuel cell; microgrid; total harmonic distortion rate; notch filter

0 引言

随着全球能源危机和环境污染等问题日益严重, 光伏、风能等可再生能源广泛地应用于微电网中, 但由于现在风光能源不能完全被应用, 弃风弃光现象成为现阶段新能源研究的重点问题^[1]。有国内外学者提出利用过剩的风能和太阳能产生清洁的氢, 通过氢燃料电池并入微电网发电, 并在高峰时段辅助供电^[2-3]。因此, 有必要针对氢燃料电池并入

微电网进行研究。其中, 氢燃料电池作为一种既高效安全又节能环保的发电装置, 具有发电效率高、稳定性好以及无污染等特点, 在近年来得到了广泛的关注。

国内许多针对氢燃料电池的研究大都应用于简单直流源, 而对氢燃料电池并网方面进行研究的文章较少。文献[4]介绍了 150 kW 的燃料电池发电系统模型, 建立了其小信号模型, 利用回溯搜索算法以提高并网的稳定性; 文献[5]介绍了 150 kW 燃料电池系统模型, 分析其采用 SQ 控制法以改善 PQ 控制系统响应速度慢导致的失稳现象; 文献[6]针对燃料电池传统并网控制方法进行改善, 采用内外双

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51767015); 甘肃省自然科学基金项目资助(2016GS07210)

并环的控制方法,并在发生三相短路故障、电压跌落和负荷突变等情况下都可以维持系统稳定。以上文献研究重点均在于燃料电池并网,但这些文章大都没有针对氢燃料电池独特的输出特性来研究并网系统控制,因此本文模拟氢燃料电池的输出特性并设计了符合其特性的变换器进行并网控制。

虚拟同步机控制(VSG)技术^[7-10]是近年来比较普遍的并入微电网的控制技术,该控制具有同步发电机的外特性,即有功功率控制引入转子运动方程为系统提供惯量和阻尼支撑,无功功率控制通过模拟定子电气特性来缓解电压降,维持电压稳定,与传统控制方式相比,VSG控制更具有优势^[11-12]。但在VSG控制中,大多数文献在功率外环引入一阶滤波器(LPF)来滤除PWM控制产生的二次纹波,但由于低通滤波器存在低频,导致带宽受限制^[13]影响了系统的稳定性和动态性能乃至引起系统振荡。文献[14]在传统下垂控制的低通滤波器中引入功率微分项和一次函数项提高了系统的动态性能和稳定性;文献[15]引入了一种基于直流均值模块的新型平均功率算法,可以实现LPF与直流均值模块自由切换,以提高滤波器的响应速度。以上文献均针对传统控制方法中平均功率的算法滤波部分进行优化改善,但都没有针对二次纹波及奇次谐波的滤波进行改进,所以本文引入了陷波滤波器来优化滤波效果,提高系统的稳定性和动态性能。

本文首先搭建了氢燃料电池并网系统模型,研究其输出特性,根据该特性设计了两级变换器,并对传统VSG并网控制的滤波器部分进行了改进。对改进后的网侧电压电流总畸变(THD)进行仿真测试,通过与IEEE Std1547-2003标准进行对比,验证了优化后滤波器及控制系统的有效性和可行性。

1 氢燃料电池并网系统

1.1 氢燃料电池建模

本文的氢燃料电池的核心部分是质子交换膜(Proton Exchange Membrane, PEM),它具有防止氢气和氧气在电极表面产生反应导致电极表面局部过热、稳定应对氧化还原反应和水解、阻止聚合链在活性氧化还原反应和酸性作用下降解等优点^[16]。燃料电池中反应物为氢气和氧气,通过化学反应生成水并产生电能。燃料电池的阳极为氢极,阴极是氧极,两极之间是电解质膜,两极均有一定量的催化剂(铂)加速电极上的电化学反应。

燃料电池的数学模型^[17-18]在50℃、常压条件下搭建,用单节氢燃料电池的理论电压值 E_N 减去损失的电压值,得到该条件下单节燃料电池的实际输

出电压 V_{cell} 。

$$V_{cell} = E_N - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (1)$$

式中: E_N 为热力学电动势; V_{act} 为活化极化过电势; V_{ohm} 为欧姆极化过电势; V_{con} 为浓差极化过电势。

由于单节燃料电池的输出电压比较低,所以本文采用多节电池组成燃料电池堆以提高其输出电压。利用前文所述氢燃料电池的数学模型建模,得到电压输出特性曲线如图1所示。同时得到氢燃料电池堆输出电压与输出功率。

燃料电池堆的输出特性曲线见图1,本文采用20个燃料电池组成的燃料电池堆得到的总电压。由图示曲线可以得知输出电压整体呈下降趋势,但在电流密度为300~700 mA/cm²时,输出电压在10~15 V区间范围内较为稳定,实际情况中在此区间的输出电压被使用的更多。该燃料电池堆的输出功率波形见图2,在燃料电池电压为10 V时, P_1 为1 978 W,电压为15 V时, P_2 为1 300 W,这个电压区间的功率较高,电压输出比较稳定,所以在连接DC/DC升压稳压逆变器时,主要采用输出电压为10~15 V,对应功率为1 300~1 978 kW来随机模拟电压和功率输出。

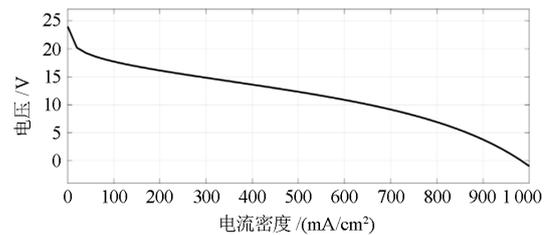


图1 燃料电池堆输出特性曲线

Fig. 1 Output characteristic curve of fuel cell stack

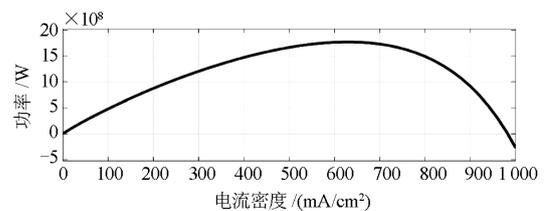


图2 氢燃料电池输出功率

Fig. 2 Output power of hydrogen fuel cell

1.2 氢燃料电池变换器设计

根据氢燃料电池的输出电压特性,可知氢燃料电池的输出直流电压会随着负载的变化而出现较大的波动,燃料电池和负载之间通常会由电力电子器件连接组成燃料电池系统,故本文采用两级变换器式的并网结构,通过两级DC/DC变换器提升并稳定电压。

两级变换器式并网系统结构的拓扑图见图 3, 主要由氢燃料电池、两级 DC/DC 变换器、DC/AC 变换器和 LC 滤波器组成, 最终并入 380 V/50 Hz 的微电网中。VSG 的原理是利用功率的双向流动来参与电网的调频调压, 而氢燃料电池不存在双向性, 故本文加入了辅助电源和双向 DC/DC 变换器, 使 VSG 系统具有双向性。后级 DC/AC 变换器采用全桥电压式逆变器, 控制核心是使逆变器的相序、频率和相位与并网的电网一致, 为使并网系统更加稳定。

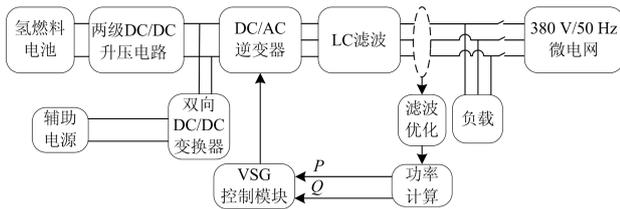


图 3 两级变换器式并网系统拓扑结构

Fig. 3 Topology structure of two-stage converter grid-connected system

氢燃料电池输出电压较低且不稳定, DC/DC 变换器需要提高并稳定输出电压, 并具有输出电压纹波小、效率高、功率密度高和电磁干扰低等性能^[16]。Boost 电路具有良好的输出特性并且结构简单可靠, 故其前级 DC/DC 变换器采用 Boost 升压变换器, 使该电压满足后级的电压要求。但只采用一级 DC/DC 变换器会因为升压倍数过大(7~9 倍)导致占空比 D 很大, 使升压的电路稳定性受影响, 故采用双级 DC/DC 变换器, 在提高电压的同时, 抑制输入电流纹波, 并且起到阻断反向电流流入。其拓扑结构如图 4 所示。

该拓扑结构先用 Boost 电路进行升压和稳定, 因为氢燃料电池的只能使能量单行流动, 之后采用隔离性变换器进行二次升压, 使系统的稳定性和安全性得到保障。相比于半桥变换器, 全桥变换器的

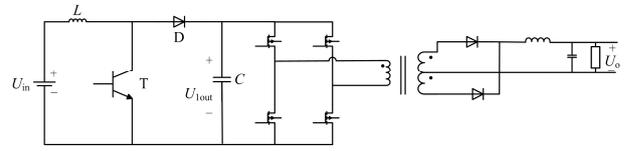


图 4 升压电路拓扑结构

Fig. 4 Topological structure of Boost circuit

开关管工作时开关应力小, 变压器磁芯使用效率高, 并且其功率等级相同时流过开关管的电流小一半, 这些均符合本文设计的电源电流和额定功率较大的特点, 因此选择采用全桥隔离型变换器进行二次升压。DC/AC 电压型逆变器采用在直流侧并联大电容的方式进行储能, 有利于控制系统与并网电网的稳定运行。

2 氢燃料电池并网控制

2.1 VSG 控制技术

氢燃料电池逆变器并网控制系统因输出电压与额定电压之间有静差, 所以采用电压外环、电流内环的结构^[19-20], 图 5 为 VSG 并网逆变器拓扑结构图。直流电压经过三相全桥逆变器及 LC 滤波器之后, 利用功率计算模块、VSG 控制模块及电压电流双闭环模块, 产生对应的电压信号, 通过 PWM 调制控制开关管导通和关断, 从而使逆变器可以模拟同步发电机的运行特性。氢燃料电池作为直流电源只向电网提供有功功率, 输出的无功功率为零, 故控制直流母线电压 U_{dc} , 即可实现对有功电流的控制。其中 $u_x(x=a,b,c)$ 为 VSG 的感应电动势; $E_x(x=a,b,c)$ 为 VSG 的三相输出电压; $i_x(x=a,b,c)$ 为逆变器的输出电流; $L_{(a,b,c)}$ 、 $C_{(a,b,c)}$ 和 $R_{L(a,b,c)}$ 分别为滤波电感、电容和电感寄生电阻; $L_{g(a,b,c)}$ 和 $R_{g(a,b,c)}$ 分别为逆变器输出电压到并网点电压之间输电线路的线路电感与电阻; P 、 Q 分别为系统的有功功率和无功功率; PWM 为脉宽调制技术。

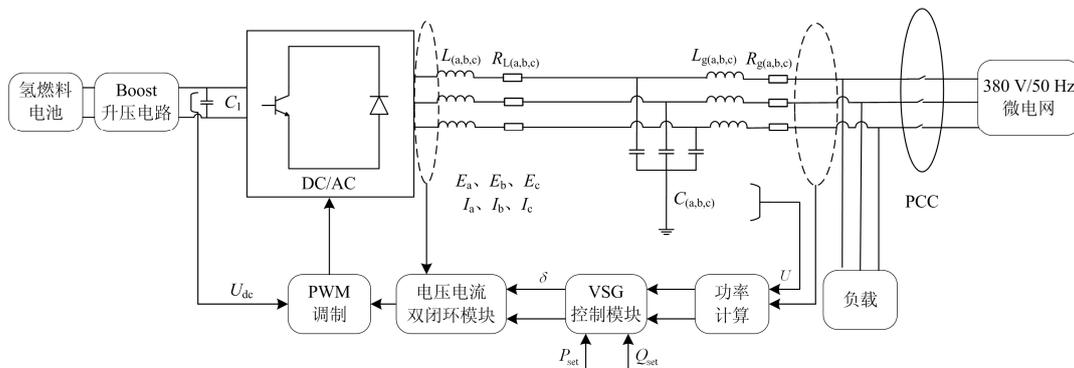


图 5 VSG 逆变器并网拓扑结构

Fig. 5 VSG grid-connected inverter topology

VSG 控制的有功功率—频率控制,其核心是引入转子方程来模拟的同步发电机的调速器,同时也引入了下垂控制,其具体表达式^[21-22]为

$$\begin{cases} J \frac{d\Delta\omega}{dt} = T_m - T_e - D\Delta\omega = \frac{P_m}{P_e} - D(\omega - \omega_0) \\ P_m = P_{ref} - K_\omega(\omega - \omega_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_m 、 T_e 分别为原动机提供的机械转矩和同步发电机的电磁转矩; J 、 D 分别为系统的转动惯量和阻尼系数; $\Delta\omega$ 为 VSG 内电势旋转频率同额定频率的差值; P_{ref} 为有功功率的参考值。

无功功率引入了同步发电机的定子电气特性,使 VSG 具有调节电压的能力,同样也引入了下垂控制进行调节,其具体表达式可通过了解同步发电机的定子电气特性^[22]得到,其具体表达式为^[23]

$$E_r = E_0 + K_Q(Q_{ref} - Q_e) \quad (3)$$

式中: E_0 和 E_r 分别为空载电动势和给定参考电动势; K_Q 为无功功率的下垂系数; Q_{ref} 和 Q_e 分别为无功功率参考值和实际值。

2.2 滤波优化

虚拟同步机控制中,中间直流电压产生的二次纹波将会被直接引入电压外环中。当二次纹波流经电流内环时,会使交流侧电流中产生奇次谐波,从而影响系统的稳定性^[24-25]。解决这种情况的核心方法是减少直流电压所产生的二次纹波,通常在功率外环引入一阶低通滤波器。但是传统的一阶低通滤波器因为低频极点的缘故导致其带宽受到限制,因此会影响到系统的稳定性和动态性能,严重的甚至会系统产生振荡。故本文引入陷波滤波器以提升系统的稳定性和动态性能。

本文采用了前馈一阶低通滤波器,对电网电压进行滤波,二次纹波产生的奇次谐波通过一阶滤波器难以消除,而引入的陷波滤波器是一种对特定频率响应的带阻滤波器,可以消除二次纹波。图 6 为陷波滤波器的伯德图,由图 6 可知陷波滤波器的频率为基波的二倍频,可以大幅度地削弱二倍频处的幅值,但它对其他频率没有影响,因此不会影响系统的带宽和性能。

图 7 为一阶低通滤波器与陷波滤波器的比较,可以看出,一阶低通滤波器在 100 Hz 时的增益是 -26 dB,陷波滤波器的增益则为 -59.1 dB,所以陷波滤波器的滤波效果更为理想。

陷波滤波器的传递函数为

$$H(s) = \frac{H_0(s^2 + \omega^2)}{s^2 + Bs + \omega_0^2} \quad (4)$$

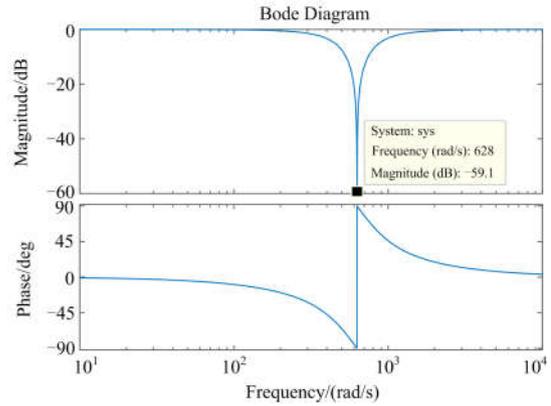


图 6 陷波滤波器伯德图
Fig. 6 Notch filter Bode diagram

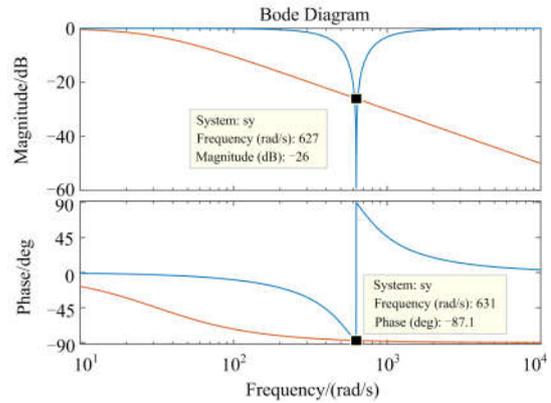


图 7 一阶滤波器与陷波滤波器伯德图对比
Fig. 7 Comparison of first-order low-pass filter and notch filter

$$\omega_0 = 2\pi f \quad (5)$$

$$B = 2\pi f_1 \quad (6)$$

式中: H_0 为滤波器增益; f 为滤波器的截止频率,本文的截止频率选取 100 Hz; ω_0 为极点频率。令 ω_z 为零点频率,当零点频率等于极点频率时,为标准陷波滤波;当零点频率大于极点频率时,为低通陷波;当零点频率小于极点频率时,为高通陷波。本文采用标准陷波,即取 $\omega_0 = \omega_z$ 。如图 8 所示, f_1 减小,工频附近成分的提取能力变强,反之亦然。但当 f_1 的值减小时,该陷波器的暂态响应速度有所降低。必须同时考虑系统响应速度和对工频成分的分离能力这两个关键因素。为提高系统响应速度及系统稳定性,本文选取 f_1 为 100 Hz。

图 9、图 10 为两种增益的单位阶跃响应对比,可以看出图 9 响应出现了较大的振荡,而改进后的单位阶跃响应的扰动影响不大,其动态性能可以满足设计要求。

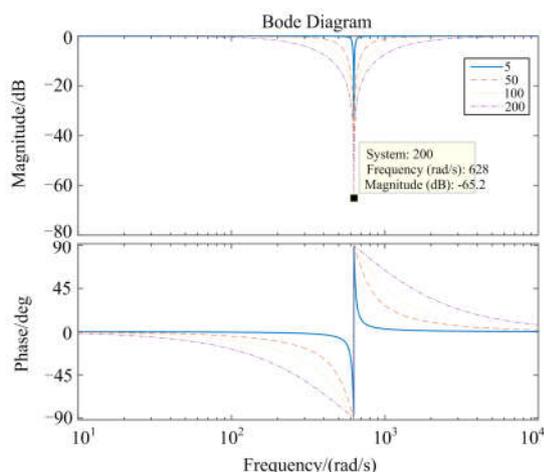
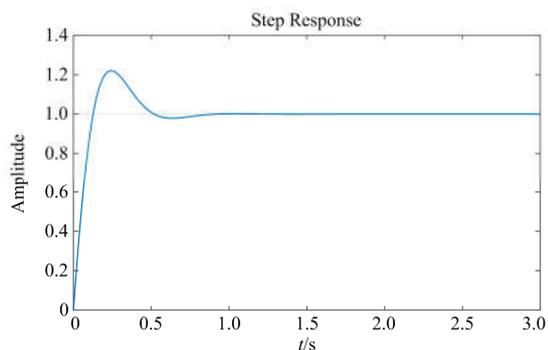
图 8 取值不同的 f_1 的伯德图Fig. 8 Bode diagram of f_1 with different values

图 9 一阶滤波器单位阶跃响应

Fig. 9 Unit step response of first-order filter

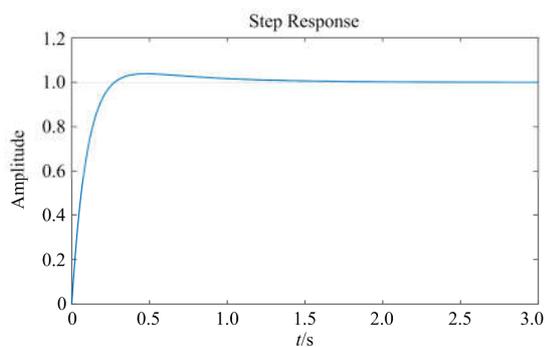


图 10 改进滤波器单位阶跃响应

Fig. 10 Unit step response of the improved filter

3 实验结果与分析

根据前文设计的氢燃料电池并网控制系统, 在 Matlab/Simulink 环境下建立了氢燃料电池模型及其虚拟同步机并网控制系统仿真模型。仿真基本参数如下: 三相电网电压为 380 V, 微电网采用的是低

压配电网 380 V/50 Hz, 本地负载为 1 MW。根据 IEEE Std1547-2003 标准, 要求并网电压电流总谐波畸变率(THD)不能超过 5%。

图 11 为一阶滤波器与改进滤波器的有功功率对比, 可以看出改进滤波器的滤波效果更好, 有效地抑制了功率的波动, 使得系统更加稳定。

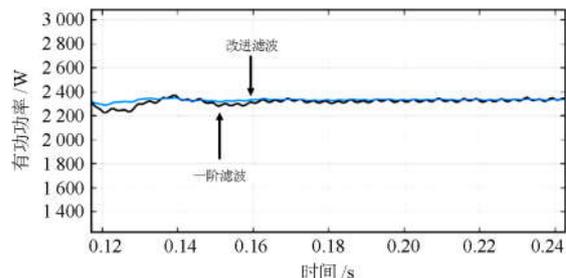


图 11 两种滤波方式的对比

Fig. 11 Comparison of two filtering methods

图 12 为氢燃料电池 VSG 控制系统并网后的 A 相并网电压电流图。由图可知, 电压和电流的相位基本保持一致, 这说明氢燃料电池 VSG 控制系统并网时, 对微电网的冲击不大, 微电网性能基本保持稳定。

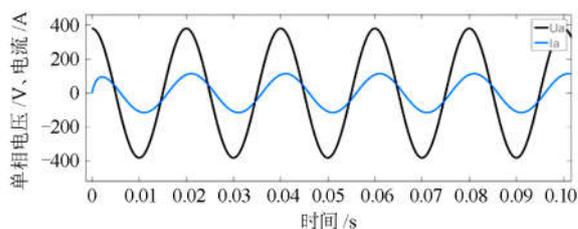


图 12 A 相并网电压电流

Fig. 12 Voltage and current of phase A grid connection

图 13、图 14 分别为滤波前后的并网三相电压图, 图 15、图 16 分别为滤波前后的并网三相电流图。对比滤波前后的电压和电流, 可以看出引入陷波滤波器有效地消除了二次纹波及奇次谐波。由图 14、图 16 可知: 并网三相电压稳定保持在 380 V, 并且与微电网的电压、频率均一致; 并网三相电流开始有一些波动, 但在短时间内恢复稳定、保持与电压相同频率, 且与微电网的电流和频率保持一致。

图 17—图 20 分别为氢燃料电池并网系统网侧滤波前后电流和电压的总谐波含量对比图。对比可知, 引入陷波滤波器后, 电流电压中的谐波成分被有效滤除, 其中, 电流的 $THD=0.31\%$, 电压的 $THD=0.03\%$, 均满足 IEEE Std1547-2003 的标准,

其谐波含量均低于规定的总谐波含量的 5%。滤波前电流的 $THD=4.21\%$ ，电压的 $THD=2.27\%$ ，与滤波后的 THD 值相比，改进滤波器的滤波效果良好，抑制效果明显，并且符合微电网的并网要求，验证了并网系统可行有效。

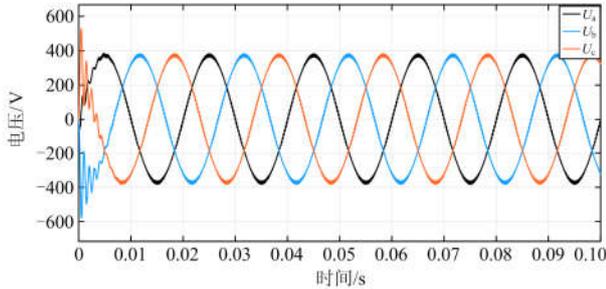


图 13 滤波前的并网三相电压

Fig. 13 Unfiltered three-phase voltage in grid connection

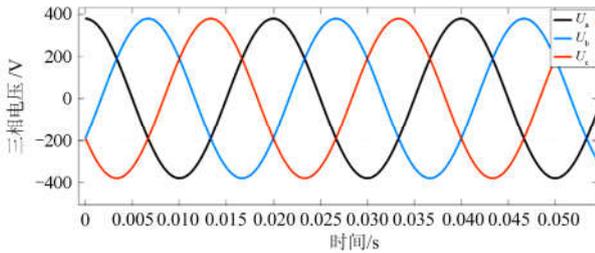


图 14 滤波后的并网三相电压

Fig. 14 Grid connected three-phase voltage after filtration

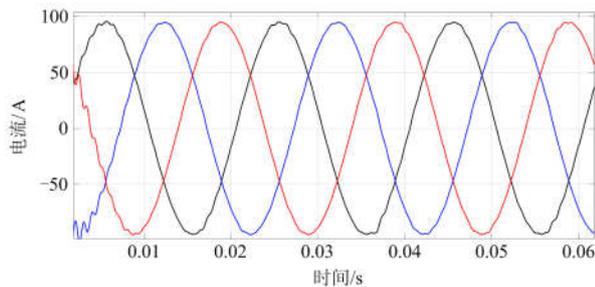


图 15 滤波前的并网三相电流

Fig. 15 Unfiltered three-phase current in grid connection

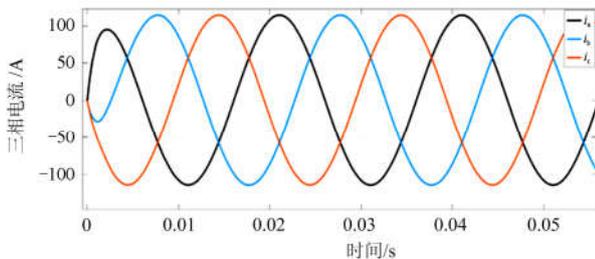


图 16 滤波后的并网三相电流

Fig. 16 Grid connected three-phase current after filtration

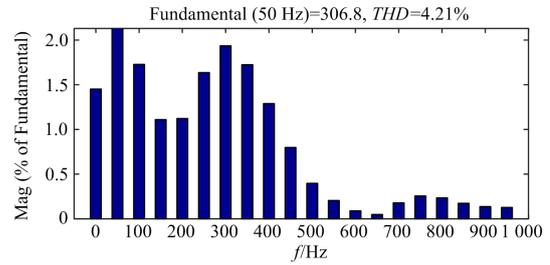


图 17 滤波前电流总谐波含量

Fig. 17 Current total harmonic content and FFT before filtration

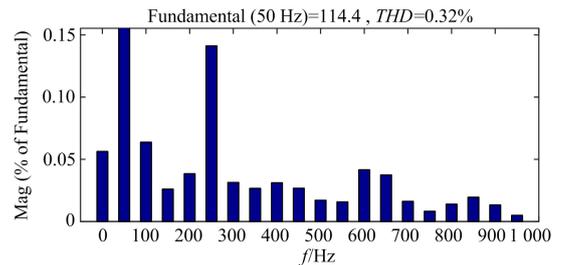


图 18 滤波后电流总谐波含量

Fig. 18 Current total harmonic content and FFT after filtration

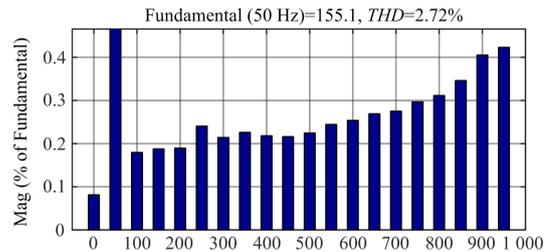


图 19 滤波前电压总谐波含量

Fig. 19 Voltage total harmonic content and FFT before filtration

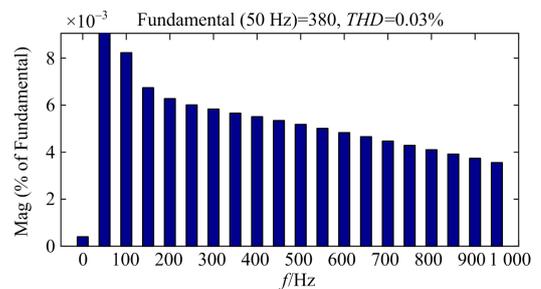


图 20 滤波后电压总谐波含量

Fig. 20 Voltage total harmonic content and FFT after filtration

4 结论

本文通过建立氢燃料电池模型，得到了氢燃料电池的电压输出特性和功率特性，并设计了两级变换器式并网控制系统，其中采用 VSG 控制方式，对其功率外环的一阶滤波器部分进行优化，及在原滤波器后加入陷波滤波器进行优化补偿，优化后的滤

波器使系统对二次纹波及奇次谐波的滤除效果更好,有效抑制了系统振荡,使整个系统更加稳定。

参考文献

- [1] 蔡国伟,陈冲,孔令国,等. 风电/制氢/燃料电池/超级电容器混合系统控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 84-94.
CAI Guowei, CHEN Chong, KONG Lingguo, et al. Control of hybrid system of wind/hydrogen/fuel cell/supercapacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 84-94.
- [2] CARDENAS A, GUZMAN C, CHEMSI M, et al. Development of AC microgrid test bench with Hydrogen fuel cell and renewable sources[C] // IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, October 25-28, 2016, Xi'an, China: 397-402.
- [3] MAROUFMASHAT A, MUKHERJEE U, RANISAU J, et al. Optimization of renewable powered hydrogen micro-grid taking in to account economic criteria[C] // IEEE Smart Energy Grid Engineering (SEGE), August 21-24, 2016, Oshawa, ON, Canada: 252-256.
- [4] 韩莹,杨寒卿,张雪霞,等. 燃料电池并网发电系统控制参数协调优化方法[J]. 太阳能学报, 2017, 38(6): 1592-1600.
HAN Ying, YANG Hanqing, ZHANG Xuexia, et al. Coordinative optimization method for control parameters of grid-connected fuel cell generation system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(6): 1592-1600.
- [5] 彭飞,赵元哲,陈维荣. 基于质子交换膜燃料电池的交直流耦合 SQ 并网控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(24): 12-18.
PENG Fei, ZHAO Yuanzhe, CHEN Weirong. A method for AC/DC coupled SQ grid-connected control based on PEMFC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 12-18.
- [6] 杨伟,林弘,赵虎. 燃料电池并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 132-137.
YANG Wei, LIN Hong, ZHAO Hu. Research on control strategy to connect fuel cells with power grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 132-137.
- [7] 丁明,杨向真,苏建徽. 基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 89-93.
DING Ming, YANG Xiangzhen, SU Jianhui. Control strategies of inverters based on virtual synchronous generator in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 89-93.
- [8] 李奇,陈维荣,刘述奎,等. 基于虚拟磁链的质子交换膜燃料电池并网控制系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 91-96.
LI Qi, CHEN Weirong, LIU Shukui, et al. Study on proton exchange membrane fuel cell grid-connected control system based on virtual flux-linkage[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 91-96.
- [9] 袁健,杨伟. 独立微网中多虚拟同步机功率精确分配控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 35-42.
YUAN Jian, YANG Wei. Accurate power sharing control strategy of multiple virtual synchronous generators in independent micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 35-42.
- [10] 陈佳瑜,李征,张骞,等. 基于虚拟同步发电机控制的分布式发电系统的阻抗边界分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 30-40.
CHEN Jiayu, LI Zheng, ZHANG Qian, et al. Impedance boundary analysis of distributed generation system based on VSG control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 30-40.
- [11] 陈中颖,胡传意,黄明明. 基于多环虚拟同步发电机的功率控制[J]. 广东电力, 2018, 31(12): 33-40.
CHEN Zhongying, HU Chuanyi, HUANG Mingming. Power control based on multi-loop virtual synchronous generator[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(12): 33-40.
- [12] 王超,武健,魏家昊,等. 改进型虚拟同步发电机控制策略[J]. 广东电力, 2017, 30(12): 38-42.
WANG Chao, WU Jian, WEI Jiahao, et al. Control strategy for improved virtual synchronous generator[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(12): 38-42.
- [13] 傅世强,张佳琦,房少军. 一种超宽阻带微带低通滤波器的设计[J]. 微波学报, 2018, 34(5): 41-43, 48.
FU Shiqiang, ZHANG Jiaqi, FANG Shaojun. Design of a microstrip low-pass filter with ultra-wide stopband[J]. Journal of Microwaves, 2018, 34(5): 41-43, 48.
- [14] 廖丽,张昌华,段雪,等. 改进下垂控制的并联逆变器小信号稳定性分析[J]. 电测与仪表, 2018, 55(18): 1-8.
LIAO Li, ZHANG Changhua, DUAN Xue, et al. Small signal stability analysis of parallel inverters with improved droop control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(18): 1-8.
- [15] 张佳. 基于虚拟磁链的微电网下垂控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
ZHANG Jia. Research on droop control strategy based on virtual flux in microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [16] 张竹茜,贾力. 质子交换膜燃料电池动态特性实验研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(8): 1399-1401.

ZHANG Zhuqian, JIA Li. Experimental study of PEM fuel cell dynamic behaviors[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(8): 1399-1401.

[17] 阮喻, 陈洪文, 沈卫东, 等. PEMFC 发电系统稳态电压模型研究[J]. 电源技术, 2011, 35(5): 520-522.
RUAN Yu, CHEN Hongwen, SHEN Weidong, et al. Study on steady voltage model of PEMFC power system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2011, 35(5): 520-522.

[18] 涂曙光, 张禾, 杜传进, 等. PEM 燃料电池动态特征的仿真分析[J]. 电源技术, 2009, 33(11): 997-1000.
TU Shuguang, ZHANG He, DU Chuanjin, et al. Simulation analysis of dynamic characteristic of PEM fuel cell[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2009, 33(11): 997-1000.

[19] TORKI W, DERBELI M. Modeling and control of a stand-alone PEMFC for AC load-PMSM application[C] // IEEE 2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS), March 23-25, 2017, Hammamet, Tunisia: 1-6.

[20] LI W B, WANG J H, SONG J Y, et al. Full-band output impedance model of virtual synchronous generator in dq framework[C] // 2018 International Power Electronics Conference, May 2018, Niigata, Japan: 1282-1288.

[21] 顾彬仕, 王建华, 骆芳芳, 等. 三相四桥臂虚拟同步发电机预同步、多环路控制及负载不平衡控制方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊 1): 138-150.
GU Binshi, WANG Jianhua, LUO Fangfang, et al. A pre-synchronization, multiple loops control, and unbalanced load control strategies for three-phase four-leg virtual synchronous generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 138-150.

[22] 颜湘武, 贾焦心, 王德胜, 等. 虚拟同步发电机的并网功率控制及模式平滑切换[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 91-99.

YAN Xiangwu, JIA Jiaoxin, WANG Desheng, et al. Power control and smooth mode switchover for grid-connected virtual synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 91-99.

[23] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its application in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.

[24] 蒋晨. 基于虚拟同步发电机的质子交换膜燃料电池发电技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
JIANG Chen. The study of proton exchange membrane fuel cell power generation technology based on virtual synchronous generator[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.

[25] 郭利辉, 张元敏, 李永辉, 等. 三相电压型 PWM 变流器交流侧 LCL 滤波器的有源阻尼策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 132-138.
GUO Lihui, ZHANG Yuanmin, LI Yonghui, et al. Research on active damping strategy of LCL filter in three-phase voltage source PWM rectifier[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 132-138.

收稿日期: 2019-12-25; 修回日期: 2020-03-15

作者简介:

徐 靖(1995—), 女, 硕士研究生, 从事虚拟同步机、微电网方面的研究; E-mail: 825537431@qq.com

赵 霞(1979—), 女, 通信作者, 副教授, 从事超导储能方面的研究; E-mail: zhaoxia@lzjtu.edu.cn

罗映红(1961—), 女, 教授, 从事超导电工学方面的研究。

(编辑 魏小丽)