

基于双二阶广义积分锁相环的燃料电池并网系统研究

刘述奎¹, 韩莹², 李奇², 陈维荣², 刘志祥²

(1. 成都电业局, 四川 成都 610021; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 针对燃料电池发电系统运行特性, 建立了燃料电池并网控制系统模型, 并设计了并网逆变器的有功/无功控制策略和基于双二阶广义积分器的锁相环(DSOGI-PLL)方案。通过在电网三相电压理想工况和三相电压不平衡条件下的仿真测试, 证明了所建立的并网控制系统能够实现单位功率因数运行。而且所设计的DSOGI-PLL能够在单相和两相电压故障情况下快速、准确地跟踪电网电压的频率和相位, 具有较好的频率自适应及对输入信号的滤波功能。验证了所设计并网系统的正确性和有效性。

关键词: 燃料电池发电; 并网系统; 改进型二阶广义积分正交发生器; 锁相环; 三相电压不平衡

Fuel cell grid-connected system based on dual second order generalized integrator phase locked loop

LIU Shu-kui¹, HAN Ying², LI Qi², CHEN Wei-rong², LIU Zhi-xiang²

(1. Chengdu Electric Power Bureau, Chengdu 610021, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: According to the operating characteristics of a fuel cell power generation system, a fuel cell grid-connected control system model is developed. An active and reactive power control strategy for grid-connected inverter and a phase locked loop based on dual second order generalized integrator (DSOGI-PLL) are also designed. Under both the normal and the faulty three-phase voltage conditions, the simulation results demonstrate that the grid-connected control system can achieve unit power factor operation. Furthermore, the proposed DSOGI-PLL is able to detect the grid voltage frequency and phase quickly and accurately under one phase and two phase voltage faulty conditions, and is provided with adaptive frequency and filtering function. The correctness and validity of the proposed grid-connected system is also verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177138).

Key words: fuel cell power generation; grid-connected system; improved second order generalized integrator-quadrature signal generator; phase locked loop; three-phase voltage unbalance

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)05-0122-07

0 引言

近年来, 节能减排、绿色能源、低碳环保、可持续发展成为各国关注焦点, 分布式发电技术在节能环保、可持续发展上具有重大意义, 是智能电网研究的一个重要组成部分。分布式发电以其投资省、发电方式灵活、与环境兼容等优势与大电网日益联合运行, 给现代电力系统运行和控制带来巨大的改变, 提高了电力系统运行的灵活性、可靠性和安全

性^[1-3]。燃料电池作为分布式电源的一种, 集高效、环保、灵活、可靠于一身, 被视为 21 世纪最有发展前途的高效清洁发电方式之一^[4-5]。

近年来, 国内外大部分文献所研究的并网控制系统主要应用于简单直流源、风力和光伏发电并网系统, 针对燃料电池并网发电系统的建模与控制研究相对较少^[6-8]。而且并网系统不仅要在理想电网电压条件下正常工作, 而且能在电网电压发生故障时也具有短时间不停机运行能力。而基于锁相环的电网同步技术是并网系统可靠工作的重要保证^[9-11]。

从控制结构上看, 锁相环可分为开环锁相环和闭环锁相环。为提高锁相环的锁相准确性和响应速度, 一般采用闭环锁相环技术。文献[12-13]研究了单同步坐标系软件锁相环, 利用估计出的相角信息, 通过电压矢量的同步旋转坐标变换, 实现理想电压

基金项目: 国家自然科学基金(51177138); 高等学校博士学科点专项科研基金(20100184110015); 铁道部科技研究开发计划(2012J012-D); 四川省国际科技合作与交流研究计划(2012HH0007); 高等学校博士学科点专项科研基金(20120184120011)

工况下的电压跟踪。文献[14]提出了基于对称分量法的单同步坐标系软件锁相环, 实现了将三相不平衡电压中的正序分量分解出来, 进而实现非理想电压工况下的电压锁相。文献[15]为消除负序分量的影响, 设计了增强型锁相环方案, 使用带通滤波器获得三相电压正交信号, 提取出了三相电压的正序分量。文献[16-17]针对三相不平衡电网电压, 提出了双同步坐标系解耦软件锁相环, 通过坐标变换和正、负序分了解耦, 实现了电网电压的锁相。

以上文献所研究的闭环锁相环技术大多存在对电网故障、电压谐波、系统频率变化较敏感等问题。而在新能源并网发电场合, 常常要求逆变器在非理想环境(如电网出现三相电压不平衡、相位突变、电压跌落或骤升、频率变化等)下运行, 这对锁相环技术提出了更高的性能要求。为克服上述问题, 本文采用基于双二阶广义积分器的锁相环技术(DSOGI-PLL)^[18], 利用广义积分器构造两相虚拟正交信号, 实现在燃料电池系统并网时对电网电压信号相位的跟踪和锁定, 并实现频率自适应及对输入信号的滤波功能。

本文首先对燃料电池并网系统进行建模, 并设计了基于燃料电池发电运行特性的并网系统控制策略和基于 DSOGI-PLL 的锁相方案。最后, 对所设计的燃料电池并网系统, 在电网电压理想工况和三相电压不平衡条件下进行了仿真测试, 验证所建控制系统和设计方案的有效性。

1 燃料电池并网系统建模

1.1 燃料电池模型

燃料电池是一种将存于燃料与氧化剂中的化学能直接转化为电能的发电装置, 由电子导电的阴极和阳极以及离子导电的电解质构成。在电极与电解质的界面上电荷载体由电子变为离子, 在阳极进行氧化反应, 燃料扩散通过阳极时失去电子而产生电流; 在阴极进行还原反应^[5]。为使以上反应持续不断发生, 在阳极上产生的电子要通过外电路到达阴极, 且氢离子必须通过电解质, 如图 1 所示。

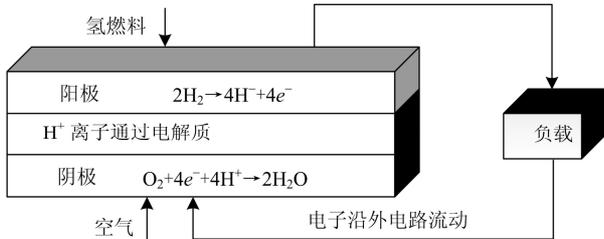


图 1 燃料电池基本原理示意图
Fig. 1 Principle of fuel cell

本文选用的燃料电池类型是质子交换膜燃料电

池(PEMFC), 其主要特点是功率密度高、运行温度低、响应速度快、稳定性好以及无污染等。PEMFC 模型是利用 Matlab/Simulink 仿真软件提供的 Fuel Cell Stack 模块进行建立。所建模型的主要方程为

$$V_{fc} = E_{oc} - NA \ln(i_{fc}) - R_{internal} \cdot i_{fc} \quad (1)$$

$$\begin{cases} E_{oc} = N(E_n - A \ln(i_0)) \\ A = \frac{RT}{z\alpha F} \end{cases} \quad (2)$$

$$E_n = \begin{cases} 1.229 + (T - 298) \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) & T \leq 100^\circ C \\ 1.229 + (T - 298) \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) & T > 100^\circ C \end{cases} \quad (3)$$

其中: V_{fc} 是燃料电池输出电压; i_{fc} 是输出电流; E_{oc} 是开路电压; A 是 Tafel 斜率; $R_{internal}$ 是等效内阻; E_n 是 Nernst 电压; i_0 是交换电流; N 是单电池数量; α 是电荷转移系数; T 是运行温度; R 是气体常数; P_{H_2} 是氢气分压; P_{O_2} 是氧气分压; z 是转移电子数; F 是法拉第常数。所建 PEMFC 等效电路模型如图 2 所示。

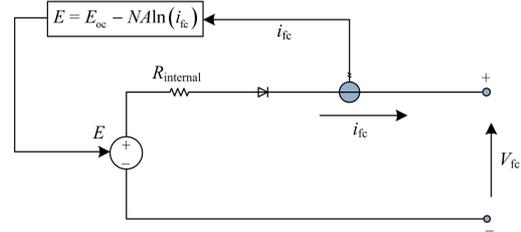


图 2 燃料电池等效电路模型

Fig. 2 Fuel cell equivalent circuit model

1.2 燃料电池并网系统拓扑

由于燃料电池的输出直流电压会随着负载变化出现一定波动^[6], 所以为改善其输出性能, 本文采用两级式并网系统结构, 即通过前级 Boost 升压变换器调整燃料电池的输出直流电压, 为后级 DC/AC 逆变器提供稳定的输入电压, 再由逆变器实现在将燃料电池提供的直流电转换成三相交流电, 最后经 LC 滤波器及 380 V/10 kV 变压器并入 10 kV/50 Hz 配电网。并网拓扑示意图如图 3 所示。

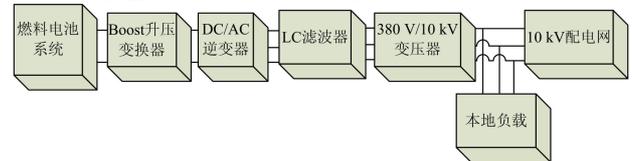


图 3 并网拓扑示意图

Fig. 3 Diagram of grid-connected structure

全桥电压型 DC/AC 逆变器的特点是通过在直流侧并联大电容进行储能, 使直流侧呈现低阻抗的

电压源特性,减小输入侧对系统响应的影响,有利于分布式发电系统与电网稳定运行,提高供电质量和减少功率损耗,而且全桥逆变电路比半桥逆变电路直流侧电压利用率高,输出谐波较小。因此,本文采用全桥电压型逆变器进行并网系统设计,其拓扑结构如图4所示。

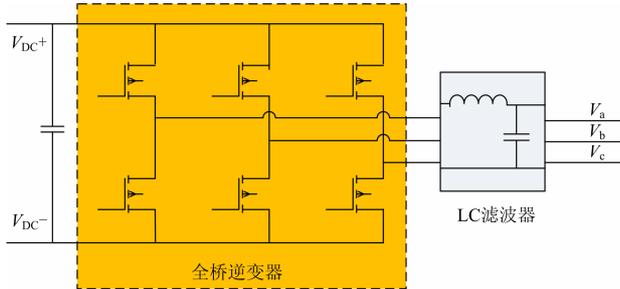


图4 逆变器电路拓扑结构
Fig. 4 Circuit topological structure of inverter

1.3 燃料电池并网控制系统设计

在本文所设计的燃料电池并网控制系统中,燃料电池系统采用恒功率拟负荷特性方式进行并网,大电网提供电压和频率的刚性支撑,并且承担电网内的负荷扰动和电压扰动。这样可以避免燃料电池发电系统直接参与电网公共连接点的电压调节,对电网产生不必要的负面影响。

由于燃料电池是直流电源,只输出有功功率,在不考虑电力电子器件吸收无功功率的条件下,燃料电池并网系统对电网仅提供有功功率,逆变器以单位功率因数逆变运行。因此,采用有功/无功(PQ)控制策略,设计直流电压外环和有功、无功电流内环控制结构。该并网控制系统中的有功功率参考值并不从外界直接给定,而是通过对直流升压变换器输出端的直流电压 V_{dc} 进行跟踪控制来实现对系统有功功率的调节。直流电压外环PI调节器的输出作为有功电流内环的参考值 i_{dref} , 其与实际测量信号 i_d 的差值经过有功电流内环PI控制器的调节得到参考值 u_{dref} , 经过反Park变换,实现旋转dq0坐标系到静止abc坐标系的转换,用于驱动SPWM的控制信号分量。同时,令 $i_{qref}=0$, 其与实际测量信号 i_q 的差值经过有功电流内环PI控制器的调节得到参考值 u_{qref} , 同理,经过反Park变换,将其与 u_{dref} 一同转化为用于驱动SPWM的控制信号分量。

该燃料电池并网控制系统采用基于双二阶广义积分器的锁相环技术(DSOGI-PLL),跟踪和锁定电网电压信号相位、频率和幅值,为Park变换提供参考角频率,是整个控制系统的核心部分。该锁相环技术将在后文进行详细叙述。图5为本文所设计的燃料电池并网控制系统示意图。

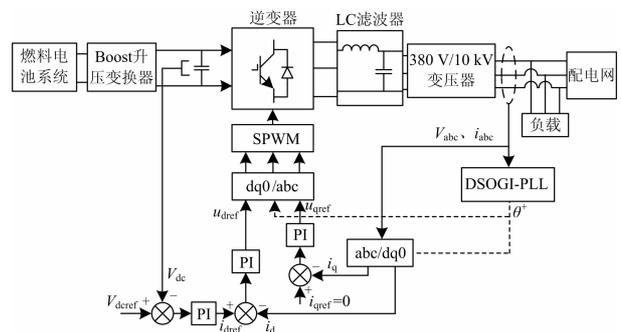


图5 燃料电池并网控制系统示意图
Fig. 5 Diagram of fuel cell grid-connected control system

2 基于双二阶广义积分器的锁相环方法

由于传统闭环锁相环方法在新能源并网发电场合,存在对电网电压谐波、系统频率变化较敏感等问题,本文采用基于双二阶广义积分器的锁相环方法(DSOGI-PLL)实现在燃料电池系统并网时对电网电压信号相位的跟踪和锁定,并提供电网电压信号的频率和幅值信息。

该方法是通过基于二阶广义积分器的正交发生器(SOGI-QSG)来实现三相电网电压正、负序分量的检测计算,再通过频率闭环控制实现对电网电压基频信号的实时跟踪,并在此过程中对电网电压的谐波分量进行滤除。该方法能够在电网电压平衡和不平衡条件下准确地获取电网电压正、负序分量的相位、幅值及频率信息。

当电网电压不平衡时,采用对称分量法可以提取三相电压 V_{abc} 的正序分量,而对电网电压进行Clark变换后,在两相静止 α - β 坐标系下提取 $V_{\alpha\beta}$ 正序分量需要对输入电压进行 90° 相角偏移,以获得两相正交电压信号。

SOGI-QSG能够产生两相正交信号,而且可以滤除高次谐波,无需坐标变换。该方法是根据内模原理,采用正弦信号的二阶谐振环节模型,实现对某频率正弦信号的无静差控制。然而,传统SOGI-QSG的系统品质因数会随输入信号频率的波动而发生变化,这会影响控制系统的动态特性^[19]。为了克服这种不足,设计了一种改进型SOGI-QSG的方法,其原理结构如图6所示。

该改进型SOGI-QSG的传递函数为

$$\begin{cases} W_1 = \frac{v_1(s)}{v(s)} = \frac{\lambda\omega_s s}{s^2 + \lambda\omega_s s + \omega_s^2} \\ W_2 = \frac{\tau v_1(s)}{v(s)} = \frac{\lambda\omega_s^2}{s^2 + \lambda\omega_s s + \omega_s^2} \end{cases} \quad (4)$$

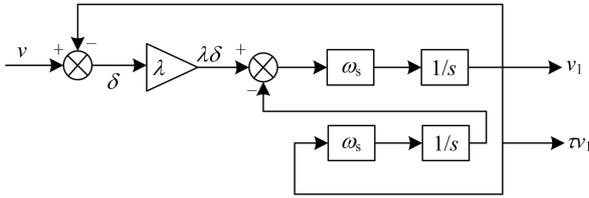


图 6 改进型 SOGI-QSG 原理示意图

Fig. 6 Diagram of improved SOGI-QSG

其中: ω_s 为谐振频率; τ 为对原信号进行 90° 的相位偏移; λ 为调节系数。

若输入信号是频率为 ω 的正弦信号 v , 则系统幅频和相频特性为

$$\begin{cases} |W_1| = \frac{\lambda\omega_s\omega}{\sqrt{(\lambda\omega_s\omega)^2 + (\omega^2 - \omega_s^2)^2}} \\ \angle W_1 = \arctan\left(\frac{\omega^2 - \omega_s^2}{\lambda\omega_s\omega}\right) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} |W_2| = \frac{\omega_s}{\omega} \frac{\lambda\omega_s\omega}{\sqrt{(\lambda\omega_s\omega)^2 + (\omega^2 - \omega_s^2)^2}} \\ \angle W_2 = \arctan\left(\frac{\omega^2 - \omega_s^2}{\lambda\omega_s\omega}\right) - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (6)$$

当改进型 SOGI-QSG 的 ω_s 为输入信号频率不相等时, 改进型 SOGI-QSG 的幅值和相位均会出现跟踪误差, 此时可将锁相环的估计频率作为 ω_s , 即可实现频率的自适应功能。此外, 系统品质因数 $Q=1/\lambda$, 与 ω_s 无关。因此, 改进型 SOGI-QSG 不仅能够实现对输入电压信号的正交分相, 而且实现了频率自适应及对输入信号的滤波功能, 在三相电压不平衡等非理想情况下具有较好的动态性能。

图 7 为所设计的 DSOGI-PLL 控制原理示意图。首先将电网侧的三相电压 V_{abc} 进行 Clark 变换, 分别通过 2 个改进型 SOGI-QSG, 在两相静止 α - β 坐标系下提取 $V_{\alpha\beta}$ 正序分量, 并获得两相正交电压信号, 再经 dq 变换得到在旋转坐标系下的电压值 v_d^+ 和 v_q^+ , 其中 dq 变换所使用的参考角度是锁相环的输出 θ^+ 。然后, 经过 PI 控制器将输出结果与检测电压额定频率 ω_f 相加后, 求得旋转角速度 ω_0 , 最后经过积分器得到锁相环输出相角 θ^+ 。

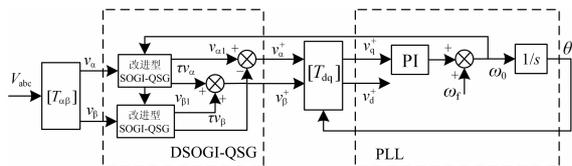


图 7 DSOGI-PLL 控制原理示意图

Fig. 7 Diagram of DSOGI-PLL

3 结果与分析

本文在 Matlab/Simulink 环境下对所设计的燃料电池并网系统在电网电压理想工况和三相电压不平衡条件下进行了仿真测试。仿真基本参数如下: 燃料电池系统额定功率为 50 kW, 直流母线参考电压为 1 000 V, 变压器变比为 380 V/10 kV, 配电网容量为 10 kV/50 Hz, 本地负载为 20 kW。

图 8 所示为燃料电池电压和功率极化曲线, 由图可知该燃料电池在额定电流为 80 A、额定电压为 625 V 的条件下, 其额定输出功率为 50 kW。下面将对电网三相电压平衡、单相故障及两相故障条件下进行测试及分析。

1) 三相电压平衡

燃料电池并网系统输出的三相电压波形呈稳定的三相交流电, 频率与电网一致, 并网系统以单位功率因数运行, 如图 9 所示。

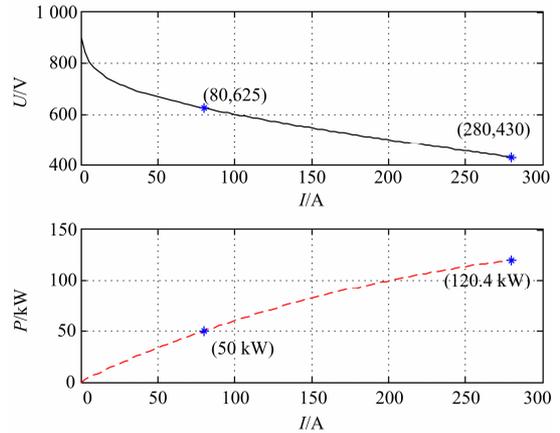


图 8 PEMFC 电压和功率极化曲线

Fig. 8 PEMFC voltage and power polarization curve

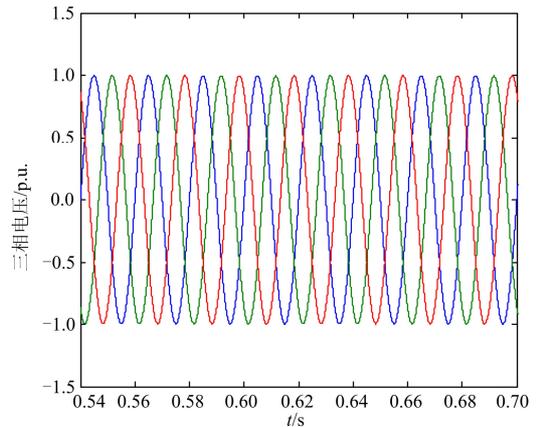


图 9 三相电压波形图

Fig. 9 Waveforms of three-phase voltage

2) 单相电压故障

假设 A 相电压在 0.6 s 时发生 20% 跌落，并网系统输出的三相电压波形基本呈稳定的三相交流电，如图 10 所示。DSOGI-PLL 经过约 0.16 s 的调整，实现了稳定、准确地跟踪电网电压的频率和相位，如图 11、图 12 所示。

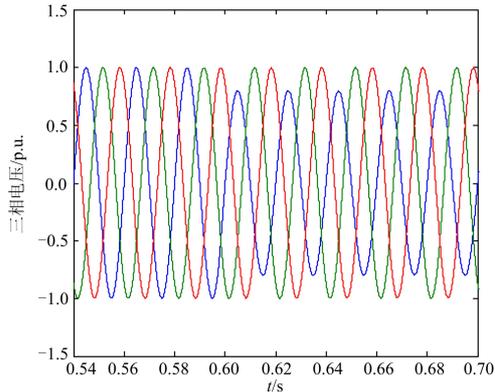


图 10 三相电压波形图 (A 相电压跌落 20%)
Fig. 10 Waveforms of three-phase voltage (phase A voltage dips by 20%)

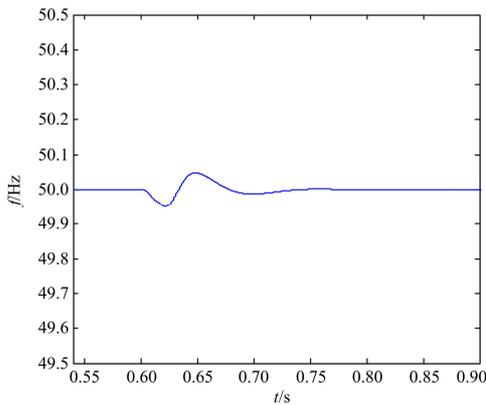


图 11 频率检测波形图 (A 相电压跌落 20%)
Fig. 11 Waveforms of frequency for detected grid voltage (phase A voltage dips by 20%)

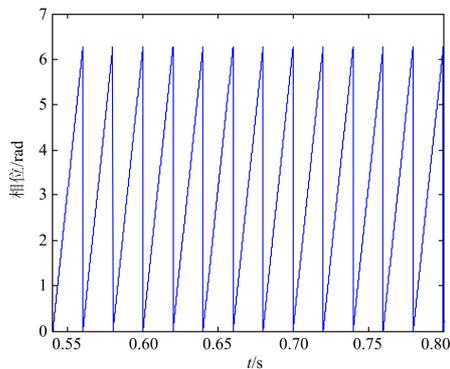


图 12 相位检测波形图 (A 相电压跌落 20%)
Fig. 12 Waveforms of phase for detected grid voltage (phase A voltage dips by 20%)

3) 两相电压故障

假设 A、B 相电压在 0.6 s 同时发生 20% 跌落，相应仿真结果如图 13 所示。由图 14、图 15 可知，在发生两相电压跌落情况下，DSOGI-PLL 经过约 0.14 s 的调整，不仅准确地跟踪上了电网电压频率和相位，而且在电压发生跌落后频率的波动较小。

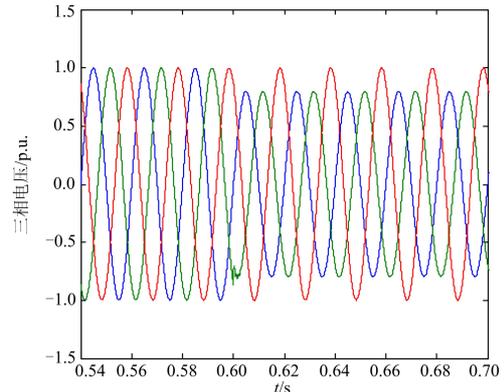


图 13 三相电压波形图 (两相电压跌落 20%)
Fig. 13 Waveforms of three-phase voltages (two-phase voltage dips by 20%)

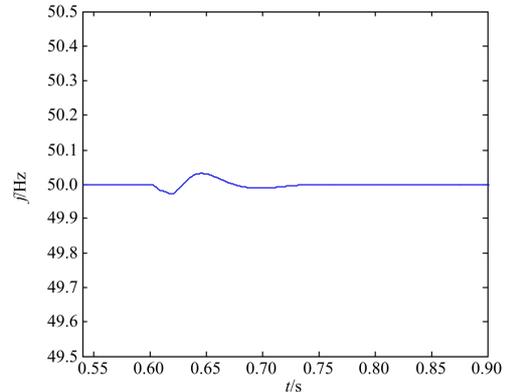


图 14 频率检测波形图 (两相电压跌落 20%)
Fig. 14 Waveforms of frequency for detected grid voltage (two phase voltages dip by 20%)

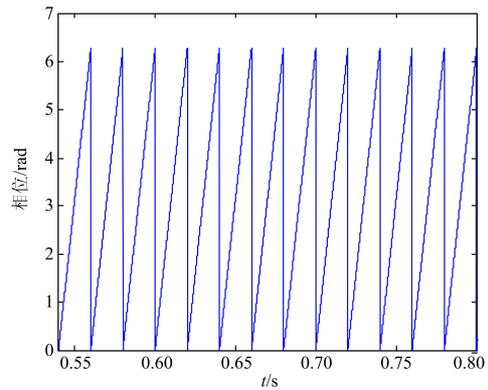


图 15 相位检测波形图 (两相电压跌落 20%)
Fig. 15 Waveforms of phase for detected grid voltage (two-phase voltage dips by 20%)

4 结论

本文在 Matlab R2012a/Simulink 环境下建立了基于燃料电池运行特性的并网控制系统仿真模型。该并网系统采用两级式并网结构, 燃料电池等效电路特性模型的输出直流电压通过 Boost 升压变换器进行调整, 为全桥电压型 DC/AC 逆变器提供稳定的输入电压, 其中逆变器采用 PQ 控制策略, 再由逆变器、LC 滤波器和变压器完成直流电到交流电的转换。由于传统闭环锁相环方法在燃料电池并网发电场合, 存在对电网电压谐波、系统频率变化较敏感等问题, 本文采用 DSOGI-PLL 实现在并网时对电网电压信号相位的跟踪和锁定。该方法是通过改进型 SOGI-QSG 来实现三相电网电压正、负序分量的检测计算, 再通过频率闭环控制实现对电网电压基频信号的实时跟踪, 并在此过程中对电网电压的谐波分量进行滤除。该方法不仅能够实现对输入电压信号的正交分相, 而且实现了频率自适应及对输入信号的滤波功能。结果表明, 该并网控制系统能够实现单位功率因数并网, 而且所设计的 DSOGI-PLL 能够在单相、两相电压故障情况下快速、准确地跟踪电网电压的频率和相位, 具有较好的电网适应性。

参考文献

- [1] THOUNTHONG P, REAL S, DAVAT B. Control strategy of fuel cell and supercapacitors association for a distributed generation system[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 3225-3233.
- [2] 张颖颖, 曹广益, 朱新坚. 燃料电池: 有前途的分布式发电技术[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 57-61.
ZHANG Ying-ying, CAO Guang-yi, ZHU Xin-jian. Fuel cell: a promising distributed generation technique[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 57-61.
- [3] 刘杨华, 吴政球, 涂有庆, 等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.
LIU Yang-hua, WU Zheng-qiu, TU You-qing, et al. A survey on distributed generation and its networking technology[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 71-76.
- [4] 丁明, 严流进, 茆美琴, 等. 分布式发电中燃料电池的建模与控制[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 8-13.
DING Ming, YAN Liu-jin, MAO Mei-qin, et al. Modeling and control of fuel cells in distributed generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 8-13.
- [5] 李奇, 陈维荣, 刘述奎, 等. 基于 H^∞ 鲁棒控制的质子交换膜燃料电池空气供应系统设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(5): 109-116.
LI Qi, CHEN Wei-rong, LIU Shu-kui, et al. Proton exchange membrane fuel cell air supply system design based on H^∞ robust control[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(5): 109-116.
- [6] 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 Wei-rong, LIU Shu-kui, 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.
- [7] 冷贵峰, 吴政球, 曾兴嘉, 等. 燃料电池并网发电控制系统的研究[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 89-93.
LENG Gui-feng, WU Zheng-qiu, ZENG Xing-jia, et al. Study on the generation control system to connect fuel cells with power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 89-93.
- [8] 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 the control strategy to connect fuel cells with power grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 132-137.
- [9] 范守婷, 王政. 风力发电并网变流器同步技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 100-106.
FAN Shou-ting, WANG Zheng. Grid synchronization technology for grid converters of wind power generation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 100-106.
- [10] 杨之俊, 吴红斌, 丁明, 等. 故障时双馈风力发电系统的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 14-18.
YANG Zhi-jun, WU Hong-bin, DING Ming, et al. Control strategy of doubly-fed wind generation system for power grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 14-18.
- [11] 杨勇, 阮毅, 汤燕燕, 等. 基于锁相环和虚拟电网磁链的三相并网逆变器[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 109-114.
YANG Yong, RUAN Yi, TANG Yan-yan, et al.

- Three-phase grid-connected inverters based on PLL and virtual grid flux[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 109-114.
- [12] HILMY A, JAN S, BOLLEN M. Tuning software phase-locked loop for series-connected converters[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 300-308.
- [13] 张治俊, 李辉, 张煦, 等. 基于单/双同步坐标系的软件锁相环建模和仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 138-144.
- ZHANG Zhi-jun, LI Hui, ZHANG Xu, et al. Simulation and modeling of software phase-locked loop based on single/double synchronous coordinate system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 138-144.
- [14] LEE Sang-joon, KANG Jun-koo, SUL Seung-ki. A new phase detecting method for power conversion systems considering distorted conditions in power system[C] // Proc Industry Applications Conf, 1999, 4: 2167-2172.
- [15] KARIMI-GHARTEMANI M. A method for synchronization of power electronic converters in polluted and variable frequency environments[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1263-1270.
- [16] TIMBUS A V, TEODORESCU R, BLAABJERG F. Synchronization methods for three phase distributed power generation systems: an overview and evaluation[J]. Power Electronics Specialists, 2005, 36(6): 2474-2481.
- [17] 周鹏, 贺益康, 胡家兵. 电网不平衡状态下风电机组运行控制中电压同步信号的检测[J]. 电工技术学报, 2008, 23(5): 108-113.
- ZHOU Peng, HE Yi-kang, HU Jia-bing. Detection of voltage synchronization signals for a wind energy generation system unbalanced grid conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(5): 108-113.
- [18] RODRIGUEZ P, LUNA A, CANDELA I, et al. Multiresonant frequency-locked loop for grid synchronization of power converters under distorted grid conditions[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 127-138.
- [19] YUAN X, MERK W, STEMMLER H, et al. Stationary frame generalized integrators for current control of active power filters with zero steady-state error for current harmonics of concern under unbalanced and distorted operating conditions[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2002, 38(2): 523-532.

收稿日期: 2013-08-16; 修回日期: 2013-11-29

作者简介:

刘述奎(1984-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为燃料电池并网技术、电力系统无功优化等;

韩莹(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网技术、电能质量技术等;

李奇(1984-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源并网技术、混合动力技术等。E-mail: liqi0800@163.com