

DOI: 10.7667/PSPC170206

光伏发电并网同步锁频环技术研究

杨旭红, 郭凯

(上海市电站自动化重点实验室, 上海电力学院自动化工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对光伏发电的低电压穿越控制要求, 研究能够适应于电网电压不平衡情况的电压快速准确检测方法显得格外重要。分析了不同锁频环技术的工作原理, 并在 Matlab/Simulink 仿真平台中分别搭建了基于双二阶广义积分器的锁频环(DSOGI-FLL)模型、基于级联二阶广义积分器的锁频环(Cascaded-SOGI-FLL)模型以及基于降阶谐振调节器的锁频环(ROR-FLL)模型。通过重点模拟电网电压不平衡情况, 对三种锁频环技术进行了对比仿真研究。结果表明: DSOGI-FLL 和 ROR-FLL 响应速度快, 适应电网电压跌落与频率突变的情况; Cascaded-SOGI-FLL 响应速度相对较慢, 适应电网电压存在谐波的情况。

关键词: 光伏发电; 锁频环; 二阶广义积分器; 级联二阶广义积分器; 降阶谐振调节器; 电网电压不平衡

Research on synchronization frequency locked loop of PV power system

YANG Xuhong, GUO Kai

(Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, Automatic Engineering of Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: According to the control requirements of the low voltage ride-through for photovoltaic power generation, it is very important to study the fast and accurate detecting method of the voltage under the unbalanced grid voltage. This paper analyzes the different working principles of frequency locked loop technology. Meanwhile, simulation models of dual second order generalized integrator frequency locked loop (DSOGI-FLL), cascaded second order generalized integrator frequency locked loop (Cascaded-SOGI-FLL) and reduced order resonant regulator frequency locked loop (ROR-FLL) are established by using Matlab/Simulink platform. By simulating the imbalanced grid voltage situation, this paper compares the simulation results of three kinds of frequency locked loop technology. The results show that the DSOGI-FLL and ROR-FLL methods have fast response speed and can adapt to the situation of the grid voltage drop and frequency change, the Cascaded-SOGI-FLL has relative slow response speed and can adapt to the situation of the grid voltage existing harmonic.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61203224).

Key words: photovoltaic power generation; frequency locked loop; second order generalized integrator; cascaded second order generalized integrator; reduced order resonant regulator; imbalanced grid voltage

0 引言

近年来, 虽然我国光伏装机容量在区域电网中的比重逐渐升高, 但其影响电网的电能质量^[1],

基金项目: 国家自然科学基金(61203224); 上海自然科学基金(13ZR1417800); 上海市电站自动化技术重点实验室开放课题(13DZ2273800); 上海市科技创新行动技术高新技术领域重点项目(14511101200); 上海市重点科技攻关计划(14110500700)

引起并网系统谐振^[2], 且当电网故障时, 光伏系统的脱网导致电网电压和频率的崩溃, 影响正常的生产和生活^[3]。为解决这一问题, 目前许多学者已经对光伏并网系统的低压穿越^[4-6]以及智能电网的继电保护新进展^[7]进行了研究, 本文重点涉及电网电压不平衡时的锁频环技术。当电网电压不平衡时, 传统的锁相环技术失效, 进而包括双二阶广义积分锁相环(DSOGI-SPLL)在内的多种改进锁相环技术相继被提出^[8]。

现阶段, 与传统的锁相环方案以相位作为控

制对象不同, 锁频环方案以频率作为控制对象, 并能省去传统锁相环中的 PI 控制环节, 结构简单且动态性能较好。其中, 文献[9-11]提出了基于二阶广义积分器的同步锁频环(SOGI-FLL)方法, 通过反馈电网频率信息以实时跟踪电网基频信号, 具有较好的鲁棒性和适应性; 文献[12-14]提出了基于双二阶广义积分器的同步锁频环(DSOGI-FLL)方法, 该方法主要是基于两相静止坐标系, 并利用一个带负增益的积分器实现对于输入频率的实时跟踪; 文献[15-16]提出了基于级联二阶广义积分器的同步锁频环(Cascaded-SOGI-FLL)方法, 该方法主要是通过级联两个系统增益不同的二阶广义积分器, 以构成一个双滤波的正交信号发生环节, 达到实时跟踪输入频率的目的; 文献[17-20]提出了基于降阶谐振调节器的同步锁频环(ROR-FLL)方法, 该方法在跟踪输入频率的同时又能够经 ROR 调节器直接实现同频率电压的正负序分离, 系统实现最为简单。

针对锁频环技术的研究现状, 为比较不同锁频环技术的性能优缺点, 本文首先从理论角度出发, 对包括 DSOGI-FLL 技术在内的三种不同锁频环技术进行详细分析。同时基于理论研究基础, 在 Matlab/Simulink 仿真环境中搭建仿真模型, 模拟电网电压平衡与不平衡两种条件, 对不同锁频环技术进行了对比仿真研究。

1 各种锁频环工作原理与建模

由图 1 可以看出: 本文采用的三相光伏并网逆变系统主要由光伏发电、三相逆变、LC 滤波、电压电流内外环控制以及锁频环共五个部分组成, 其中本文研究的重点在于锁频环环节。锁频环技术主要基于两相静止坐标系, 并以电网频率作为直接控制对象, 频率和相位锁定效果更优, 应用前景更为广泛。

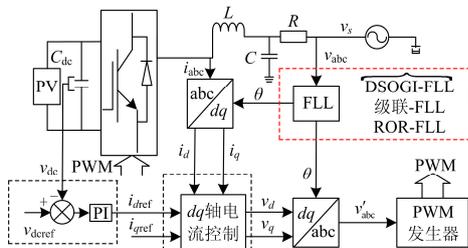


图 1 三相光伏并网逆变系统结构图

Fig. 1 Block diagram of three-phase PV grid connected inverter system

1.1 DSOGI-FLL 工作原理与建模

基于双二阶广义积分器的同步锁频环技术,

首先由双二阶广义积分器构造两相虚拟信号, 然后通过频率闭环控制实现对电网电压基频信号的实时跟踪。

1.1.1 二阶广义积分正交信号发生器

由图 2 所示的 SOGI-QSG 控制原理图可知, 该发生器可以实现对于某一频率正弦信号的无静差跟踪。其中 v 为输入信号, v' 和 qv' ($q = e^{-j\pi/2}$) 为输出信号, 且由式(1)所示 SOGI-QSG 闭环传递函数可知: v' 和 qv' 与 v 幅值相等, 但 v' 与 v 同相, qv' 滞后 v 90° ; k 和 ω' 分别为系统增益和谐振频率, 同时 k 值的大小影响着该正交信号发生器的滤波性能, 需要合理设计。

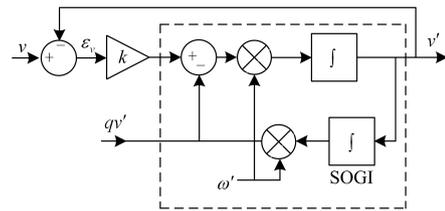


图 2 SOGI-QSG 控制原理图

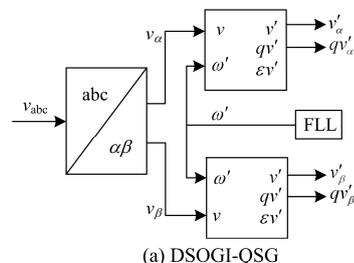
Fig. 2 Block diagram of SOGI-QSG

$$\begin{cases} D(s) = \frac{v'}{v}(s) = \frac{k\omega's}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \\ Q(s) = \frac{qv'}{v}(s) = \frac{k\omega'^2}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \end{cases} \quad (1)$$

1.1.2 DSOGI-FLL 工作原理与建模

DSOGI-FLL 由双正交信号发生器(DSOGI-QSG)、锁频环(FLL)以及正负序分离计算模块(PNSC)三个部分组成, 分别如图 3(a)、3(b)和 3(c)所示。其中 FLL 具有频率自适应的作用, 可以用来直接对输入信号进行闭环控制。图 3(b)中负增益 $-\Gamma$ 用来实现对谐振频率 ω' 的负反馈, 电网频率 ω_{ff} 用作前馈项以加快暂态过程, 进而实现快速锁频, $\omega_{ff}=314 \text{ rad/s}$ 。

由图 4 所示 DSOGI-FLL 的同步锁频流程可知: 三相电网电压 v_{abc} 首先经 Clarke 变换, 得到两相静止电压 $v_{\alpha\beta}$; 然后 v_α 、 v_β 分别经双正交信号发生器产生同相输出信号 v'_α 、 v'_β 以及 90° 相位滞后信号 qv'_α 、 qv'_β ; 最后经正负序分离计算模块



(a) DSOGI-QSG

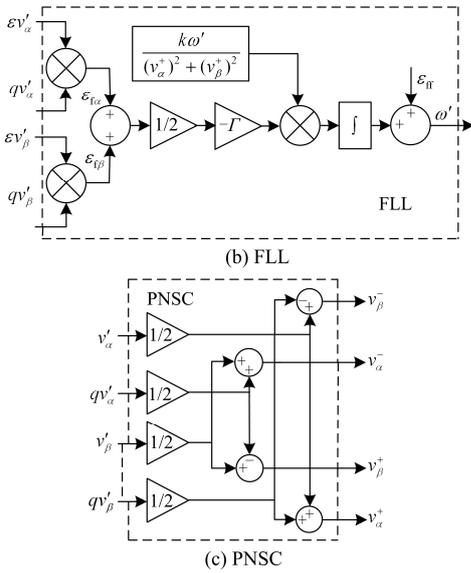


图 3 DSOGI-FLL 的原理框图

Fig. 3 Block diagram of DSOGI-FLL

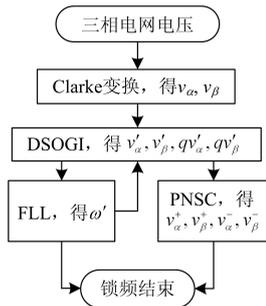


图 4 DSOGI-FLL 实现流程

Fig. 4 Flow chart of DSOGI-FLL realization

获取正序电压分量 v_{α}^+ 、 v_{β}^+ 以及负序电压分量 v_{α}^- 、 v_{β}^- 。其中双正交信号发生器的输入信号 ω' 由图 3(b)所示的 FLL 提供。

1.2 Cascaded-SOGI-FLL 工作原理与建模

基于级联二阶广义积分器的同步锁频环技术即在 DSOGI-FLL 的基础上级联两个系统增益不同的二阶广义积分器，以构成一个双滤波的正交信号发生环节，同时通过锁频环和正负序分量计算模块，有效消除负序分量和谐波分量的影响，实现并网逆变与电网良好同步^[12]。

1.2.1 级联二阶广义积分器

如图 5 所示为级联二阶广义积分正交信号发生器结构框图，该正交信号发生器的闭环传递函数如式(2)所示，式中系统增益 $k'=\lambda k(\lambda \neq 1$ ，为比例系数)。且由式(2)的幅频特性可知：在经级联二阶广义积分正交信号发生器后，输出信号 v'' 和 qv'' 与输入信号 v 幅值相等，但是 v'' 滞后 v 90° ， qv''

滞后 v 180° 。

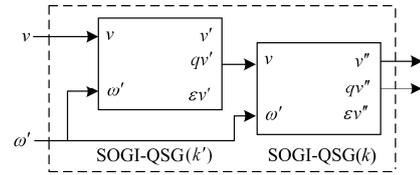


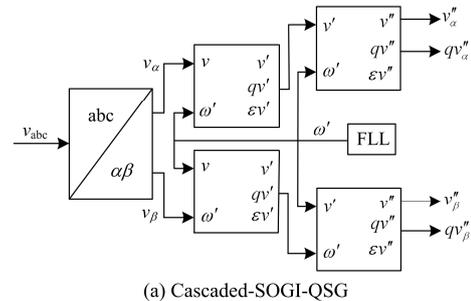
图 5 级联二阶广义积分正交信号发生器结构框图

Fig. 5 Block diagram of cascaded-SOGI-QSG

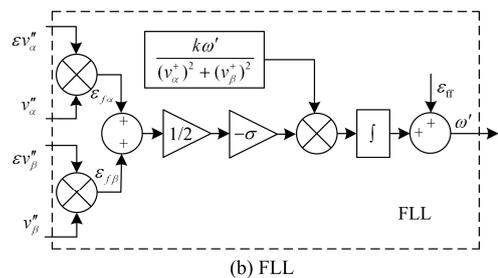
$$\begin{cases} D'(s) = \frac{v''}{v}(s) = \frac{kk'\omega'^3 s}{(s + k\omega' s + \omega'^2) \times (s^2 + k'\omega' s + \omega'^2)} \\ Q'(s) = \frac{qv''}{v}(s) = \frac{kk'\omega'^4}{(s^2 + k\omega' s + \omega'^2) \times (s^2 + k'\omega' s + \omega'^2)} \end{cases} \quad (2)$$

1.2.2 Cascaded-SOGI-FLL 工作原理与建模

基于级联二阶广义积分器的同步锁频环主要由图 6(a)、6(b)和 6(c)所示的级联正交信号发生器、锁频环和正负序分离计算模块三部分组成。分析图 7 所示 Cascaded-SOGI-FLL 的同步锁频流程，可知：三相电网电压 v_{abc} 经 Clarke 变换转化为两相静止坐标系下的 $v_{\alpha\beta}$ 信号；然后两相信号 $v_{\alpha\beta}$ 分别经级联二阶广义积分正交信号发生器获取相位滞后 90° 的输出信号 v_{α}'' 和 v_{β}'' 以及相位滞后 180° 的输出信号 qv_{α}'' 和 qv_{β}'' ；最后前级信号流向正负序分离计算模块，得到正序电压 v_{α}^+ 和 v_{β}^+ ，负序电压 v_{α}^- 和 v_{β}^- 。其中图 6(b)所示 FLL 的输出信号 ω' 反馈流入级联二阶广义积分正交信号发生器环节，因为此处锁频环设计与 DSOGI-FLL 中的锁频环类似，故不再进行详细阐述。



(a) Cascaded-SOGI-QSG



(b) FLL

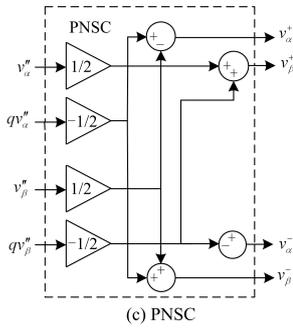


图 6 Cascaded-SOGI-FLL 的原理框图

Fig. 6 Block diagram of Cascaded-SOGI-FLL

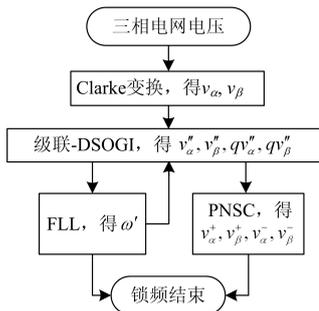


图 7 Cascaded-SOGI-FLL 实现流程

Fig. 7 Flow chart of Cascaded-SOGI-FLL realization

1.3 ROR-FLL 工作原理与建模

基于降阶谐振调节器的同步锁频环技术可以经 ROR 调节器直接实现同频率电压的正负序分离, 简化了正负序分离系统的结构^[14]。

1.3.1 ROR 调节器原理

为弥补 SOGI 只有频率选择性而无极性选择性的不足, 文献[14]提出将 SOGI 进行降阶处理以获取降阶谐振(ROR)调节器, 对应传递函数为

$$G_R(s) = \frac{k}{s - j\omega'} \quad (3)$$

式(3)中: k 为 ROR 调节器的增益系数; ω' 为谐振频率, ROR 调节器在极点 $s=j\omega'$ 处的幅值增益最大。由于该调节器基于复数域, 可应用对称系统中 $\alpha\beta$ 静止坐标系下变量满足 $x_\alpha = jx_\beta$ 的关系, 实现复数 j , 对应结构框图如图 8 所示。

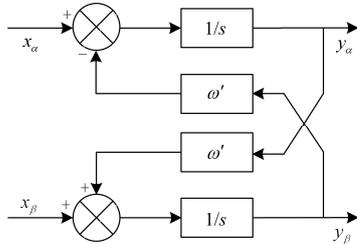


图 8 ROR 调节器的结构框图

Fig. 8 Block diagram of ROR controller

1.3.2 ROR-FLL 工作原理与建模

由图 9 所示 ROR-FLL 的同步锁频流程可知: 三相电网电压 v_{abc} 首先经 Clarke 变换, 得到两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压 v_α 和 v_β ; 然后该两相电压作为指令值, 与分离出来的对应相正负序分量之和做差, 获取两相误差信号 $\varepsilon_{v\alpha}$ 和 $\varepsilon_{v\beta}$; 最后经 ROR 调节器实现正负序分离。其中如图 10(b)所示锁频环, 只需采用负增益系数为 $-\delta$ 的积分器来实现电网频率的实时跟踪; 与此同时将电网电压额定频率 ω_{ff} 作为前馈项以加快系统动态响应。

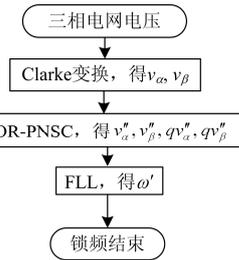
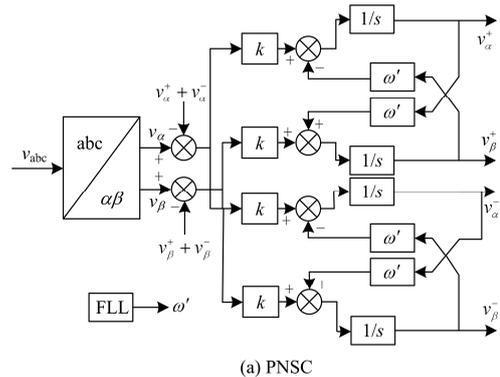
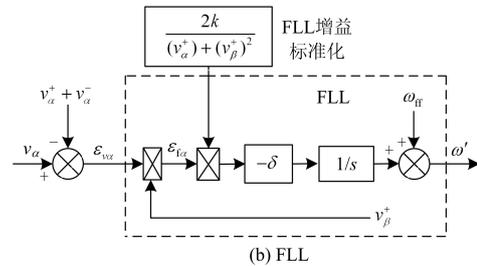


图 9 ROR-FLL 实现流程

Fig. 9 Flow chart of ROR-FLL realization



(a) PNSC



(b) FLL

图 10 ROR-FLL 的原理框图

Fig. 10 Block diagram of ROR-FLL

2 各种锁频环技术性能仿真比较

为进一步研究上述三种不同锁频环技术, 在 Matlab/Simulink 仿真环境中分别搭建了 DSOGI-FLL、Cascaded-SOGI-FLL 和 ROR-FLL 仿真模型, 设置不同电网电压仿真条件进行相应参数调试, 对比研究三种不同锁频环技术的性能

优劣。其中各锁频环技术仿真参数设置如表 1 所示。

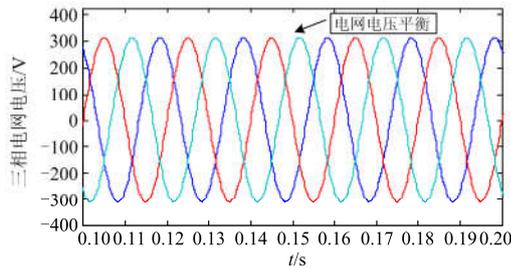
表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameters

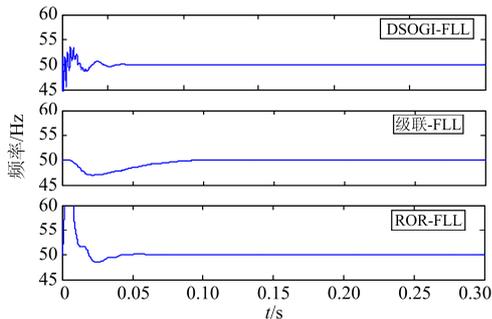
锁频环类型	参数设置
DSOGI-FLL	$k=1.414; \Gamma=100$
级联-FLL	$k=0.707; \sigma=0.3$
ROR-FLL	$k=200; \delta=100$

2.1 三相电网电压平衡电压检测

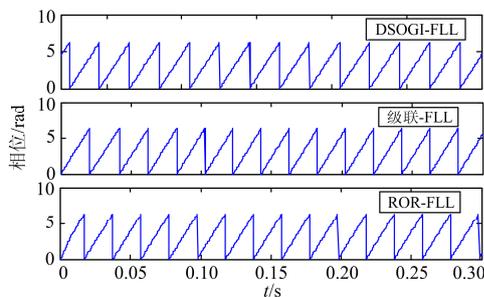
如图 11(a)所示,假设三相电网电压平衡,幅值大小为 311 V,频率为 50 Hz,其中 A 相电压初始相位为 0, B 相电压初始相位为 $-2\pi/3$, C 相电压初始相位为 $+2\pi/3$,仿真结果分别如图 11(b)和 11(c)所示。



(a) 三相平衡电网电压



(b) 频率锁定结果



(c) 相位锁定结果

图 11 三相平衡电网电压检测结果

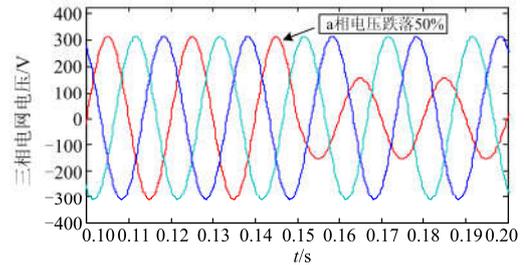
Fig. 11 Detection results of three-phase balanced power grid voltage

分析图 11(b)和 11 (c)所示频率和相位仿真结

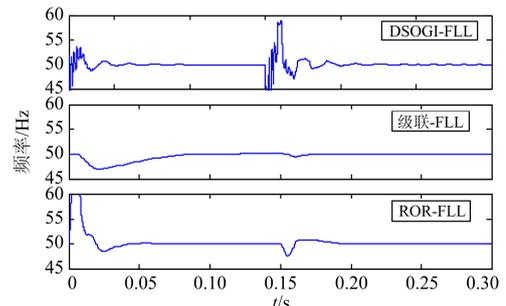
果可知:当三相电网电压平衡时,三种锁频环技术都能够实现对于电网电压频率和相位的准确锁定。其中 DSOGI-FLL 和 ROR-FLL 锁频环技术调节时间大致相同,约需 0.05 s 左右。对于 Cascaded-SOGI-FLL 锁频环技术而言,由于其 $\alpha\beta$ 两相分量各需级联两个二阶广义积分器,内部结构相对复杂,故调节时间明显多于其他两种锁频环技术,约需 0.1 s 左右。

2.2 单相电网电压跌落电压检测

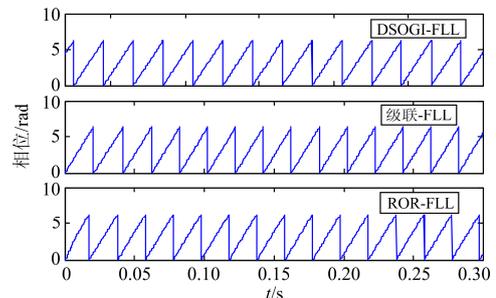
如图 12(a)所示,假设 A 相电网电压跌落,平衡时幅值大小为 311 V,频率为 50 Hz,其中 A 相电压初始相位为 0,在 0.15 s 时电压幅值跌落 50%, B 相和 C 相电压初始相位分别为 $-2\pi/3$ 和 $+2\pi/3$,电压幅值恒定不变,仿真结果分别如图 12(b)和 12(c)所示。



(a) A相电网电压跌落50%时的电网电压



(b) 频率锁定结果



(c) 相位锁定结果

图 12 A 相电网电压跌落 50%时检测结果

Fig. 12 Detection results of A phase power grid voltage drop by 50%

如图12(b)和12(c)所示A相电网电压跌落 50%时的频率与相位仿真结果可知:三种锁频环技术

在经过不同程度短暂波动后均能实现准确锁定, 其中 DSOGI-FLL 锁频环技术在电压跌落波动范围最大, 二次稳定的调节时间也最长; ROR-FLL 锁频环技术则在短暂的频率跌落, 约经 0.02 s 左右再次实现频率和相位的准确锁定; 就电网电压跌落后的稳定性而言, Cascaded-SOGI-FLL 锁频环技术的频率和相位锁定曲线最为平滑, 效果最优。

2.3 电网电压频率突变电压检测

如图 13(a)所示, 假设三相电网电压频率突变, 平衡时幅值大小为 311 V, 频率为 50 Hz, 其中 ABC 三相电压初始相位分别为 0、 $-2\pi/3$ 和 $+2\pi/3$, 在 0.15 s 时三相电网电压频率突变为 60 Hz, 仿真结果分别如图 13(b)和 13(c)所示。

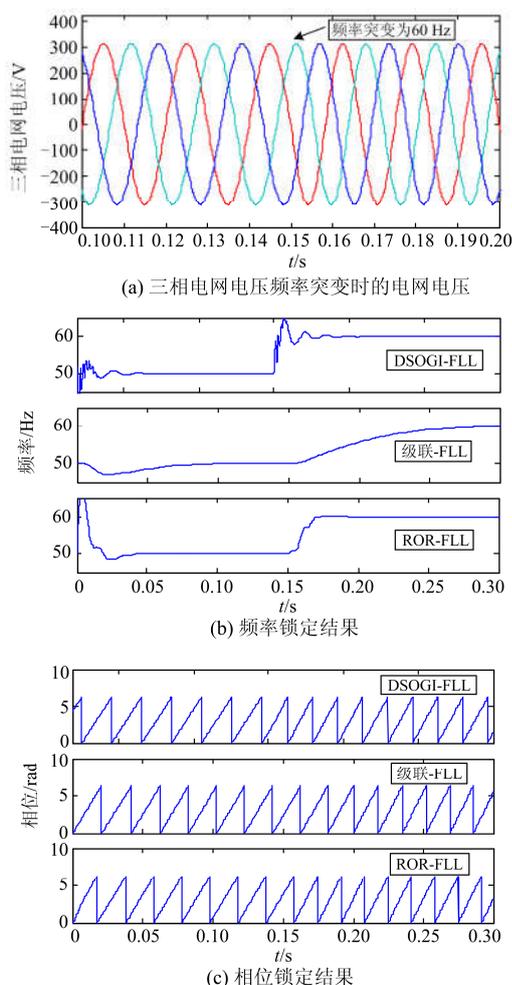


图 13 三相电网电压频率突变时检测结果

Fig. 13 Detection results of three-phase voltage frequency mutation

如图 13(b)和 13(c)所示: 在三相电网电压频率突变情况下, 三种锁频环技术在经过一定时间

调整后均能实现频率和相位的准确锁定。相较于其他两种锁频环技术, Cascaded-SOGI-FLL 锁频环技术调节时间最长, 约为 0.1 s 左右; DSOGI-FLL 和 ROR-FLL 锁频环技术调节时间相当, 约为 0.03 s 左右, 但是相比于 ROR-FLL, DSOGI-FLL 锁频环技术在电网电压频率突变后的初期波动范围更大。

2.4 电网电压注入谐波电压检测

如图 14(a)所示, 假设往三相电网电压注入不同阶次谐波, 平衡时幅值大小为 311 V, 频率为 50 Hz, 其中 ABC 三相电网电压初始相位分别为 0、 $-2\pi/3$ 和 $+2\pi/3$, 在 0.15 s 时注入 2 次谐波和 3 次谐波, 仿真结果分别如图 14(b)和 14(c)所示。

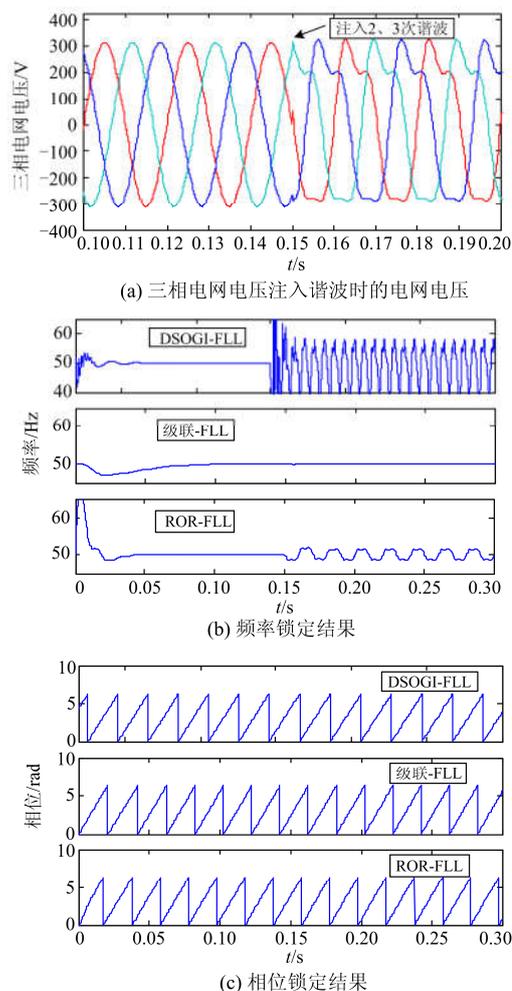


图 14 三相电网电压注入谐波时检测结果

Fig. 14 Detection results of three-phase grid voltage injection harmonic

由图 14(b)和 14(c)可知: 在往三相电网电压注入 2 次谐波和 3 次谐波后, DSOGI-FLL 锁频环技术失效; ROR-FLL 锁频环技术的频率锁定出现

较小范围波动,波动幅度维持在 ± 1 Hz之间;同时与其他两种锁频环技术形成鲜明对比,Cascaded-SOGI-FLL锁频环技术几乎无波动地实现频率和相位的准确锁定,曲线最为平滑,效果

最优。综合以上理论分析以及不同电网电压条件下的仿真结果,将三种不同锁频环技术的优缺点和适用范围进行汇总,如表2所示。

表2 三种锁频环优缺点与适用范围

Table 2 Merits, disadvantages and application scope of three kinds of FLL

锁频环类型	优点	缺点	适用范围
DSOGI-FLL ^[9-11]	所需元器件较少,经济性好 动态响应速度快 ^[9-11] 理想电网检测初期,检测频率跳变小	电网故障初期,检测频率跳变大 电网谐波畸变时,检测频率效果最差 级联两个二阶广义积分器,系统结构复杂	电网电压平衡情况 电网电压频率突变情况
级联-FLL ^[12-13]	抑制电网谐波能力强 抑制电压跌落能力强	所需元器件多,经济性差 动态响应速度慢	电网电压平衡情况 电网电压幅值跌落情况 电网电压存在谐波畸变情况 ^[12]
ROR-FLL ^[14-17]	直接进行正负序分离,系统结构简单 ^[13-16] 所需元器件最少,经济性最好 动态响应速度快 ^[14-17] 电网故障初期,检测频率跳变小	理想电网检测初期,检测频率跳变小 电网谐波畸变时,检测频率效果较差	电网电压平衡及频率突变情况 非理想电网电压正负序分离 ^[14] 新能源发电系统“零电压穿越”场合 ^[17]

3 结论

本文主要介绍了包括DSOGI-FLL、Cascaded-SOGI-FLL以及ROR-FLL在内的三种电网同步锁频环技术,详细分析了三种不同锁频环技术的理论原理,并利用Matlab仿真平台搭建各自对应的仿真模型,从电网电压平衡和电网电压不平衡两个角度出发,对三种同步锁频环技术进行了对比仿真研究。仿真结果表明:DSOGI-FLL锁频技术可以在电网电压平衡、跌落以及频率突变三种条件下实现频率和相位的快速准确锁定,但是在调节初始阶段波动范围较大,不适用于电网电压注入谐波的情况;Cascaded-SOGI-FLL在对频率和相位进行准确锁定时所需时间最长,但是其稳定性最好,对于电网电压注入谐波的情况调节效果最优;ROR-FLL准确锁定频率和相位时所需时间与DSOGI-FLL几乎相近,但是其在调节初始阶段的波动范围较小,且相较于DSOGI-FLL更加适用于电网电压注入谐波的情况。

参考文献

- [1] 秦鹏, 崔国柱, 郭昌林, 等. 光伏接入对配电网电能质量的影响及最大接入容量分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 145-150.
- [2] 高静, 李鹏, 孙健. 分布式光伏集群谐振分布范围及其影响因素分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(7): 125-131, 148.

- GAO Jing, LI Peng, SUN Jian. Analysis of resonance distribution range and influence factors of clustered distributed photovoltaic[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(7): 125-131, 148.
- [3] 梁海峰, 冯燕闯, 刘子兴, 等. 基于无差拍控制的光伏电站低电压穿越技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 110-115.
- LIANG Haifeng, FENG Yanchuang, LIU Zixing, et al. Research on low voltage ride through of photovoltaic plant based on deadbeat control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 110-115.
- [4] 翦志强, 司徒琴. 三相电压不对称跌落光伏并网逆变器控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 126-130.
- JIAN Zhiqiang, SI Tuqin. Control method of photovoltaic grid-connected inverter under three-phase voltage unbalanced dips[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 126-130.
- [5] 范柱烽, 毕大强, 任先文, 等. 光储微电网的低电压穿越控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 6-12.
- FAN Zhufeng, BI Daqiang, REN Xianwen, et al. Low voltage ride-through control of the photovoltaic/ battery micro-grid system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 6-12.
- [6] 陈亚爱, 刘劲东, 周京华, 等. 新能源并网逆变器的低电压穿越技术[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(8): 51-57.
- CHEN Yaai, LIU Jindong, ZHOU Jinghua. Low voltage ride through for new energy grid connected inverter[J]. Electric Machines & Control Application, 2014, 41(8):

- 51-57.
- [7] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [8] 赵贵龙, 曹玲玲, 祝龙记. 基于光伏并网逆变系统的改进锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 108-112.
- ZHAO Guilong, CAO Lingling, ZHU Longji. Improved PLL design of PV grid inverter system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 108-112.
- [9] 雷芸, 肖岚, 郑昕昕. 不理想电网下基于二阶广义积分的锁频环[J]. 电力电子技术, 2016, 50(8): 89-93.
- LEI Yun, XIAO Lan, ZHENG Xinxin. A frequency-locked loop technology based on second order generalized integrator under non-ideal voltage conditions[J]. Power Electronics, 2016, 50(8): 89-93.
- [10] 刘桂花, 曹小娇, 王卫. 弱电网下单相光伏并网逆变器锁频环同步方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 5022-5029.
- LIU Guihua, CAO Xiaojiao, WANG Wei. A frequency locked loop grid synchronization method of single phase grid-connected PV inverter under weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 5022-5029.
- [11] RODRIGUEZ P, LUNA A, MUNOZ-AGUILAR R S, et al. A stationary reference frame grid synchronization system for three-phase grid-connected power converters under adverse grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1): 99-112.
- [12] 王国宁, 孙鹏菊, 杜雄, 等. 电网电压不对称时锁频环同步信号检测方法的动态性能[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 163-171.
- WANG Guoning, SUN Pengju, DU Xiong, et al. Dynamical performance of frequency-locked loop synchronization method under asymmetric grid voltage condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 163-171.
- [13] 汪令祥, 王成悦, 孟祥志, 等. 基于双二阶广义积分器锁频环的电网同步技术[J]. 电力电子技术, 2016, 50(6): 34-36.
- WANG Lingxiang, WANG Chengyue, MENG Xiangzhi, et al. A grid synchronization control technique based on the double second-order generalized integrator FLL[J]. Power Electronics, 2016, 50(6): 34-36.
- [14] 张占锋, 樊艳芳, 王一波, 等. 基于双二阶广义积分锁频环的光伏并网发电系统仿真研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(8): 1151-1158.
- ZHANG Zhanfeng, FAN Yanfang, WANG Yibo, et al. Simulation of PV grid-connected generation system based on double second-order generalized integral frequency-locked loop[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(8): 1151-1158.
- [15] 庞科旺, 包其仕. 逆变器在电网故障下的并网同步化技术[J]. 电测与仪表, 2015, 52(21): 40-43.
- PANG Kewang, BAO Qishi. Grid-connected synchronization method for inverters under grid fault conditions[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(21): 40-43.
- [16] 包其仕. 三相光伏并网逆变器的控制技术研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2015.
- BAO Qishi. The study of control method based on three-phase photovoltaic grid-connected inverter[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2015.
- [17] 赵新, 金新民, 周飞, 等. 采用降阶谐振调节器的并网逆变器锁频环技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15): 38-44.
- ZHAO Xin, JIN Xinmin, ZHOU Fei, et al. A frequency-locked loop technology of grid-connected inverters based on the reduced order resonant controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(15): 38-44.
- [18] 赵新, 金新民, 杨捷, 等. 并网逆变器新型不平衡控制方案[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 257-265.
- ZHAO Xin, JIN Xinmin, YANG Jie, et al. Novel unbalanced control scheme of grid-connected inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 257-265.
- [19] 赵新. 电励磁直驱风力发电机并网控制技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- ZHAO Xin. Grid-connected control technology for electricity excitation direct-driven wind power generation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [20] 郑玉浩. 光伏并网系统故障穿越关键技术的研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2016.
- ZHENG Yuhao. Research on fault ride through strategic techniques of grid-connected[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2016.

收稿日期: 2017-02-17; 修回日期: 2017-04-12

作者简介:

杨旭红(1969—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为智能电网控制技术、新能源发电及储能; E-mail: yangxuhong.sh@163.com

郭凯(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电并网控制技术. E-mail: guokai1949@163.com

(编辑 葛艳娜)