

Summary of Control Strategy of Unbalanced Three-Phase Power Grid-Connected Inverter

Hao Liu Wei Wang

Changchun University of Technology, Changchun, Jilin, 130012, China

Abstract

When the voltage on the grid side is unbalanced, the output active power and current of the grid-connected inverter will have secondary pulsation and distortion. In order to effectively reduce the impact of grid-connected inverter on power grid and improve the grid-connected current quality of grid-connected inverter when the power grid is unbalanced, it is urgent to study the control strategy of grid-connected inverter when the power grid is unbalanced. According to different control objectives, the existing control strategies of grid-connected inverter are reviewed from the aspects of grid-connected synchronization algorithm, positive and negative sequence separation, current tracking control, harmonic compensation and filter technology. Finally, the development trend of grid-connected inverter and its control strategy under unbalanced power grid is discussed.

Keywords

unbalanced grid; grid-connected inverters; Goertzel filters; control strategies; overview

不平衡三相电网并网逆变器控制策略综述

刘浩 王蔚

长春工业大学, 中国·吉林 长春 130012

摘要

当电网侧电压不平衡时, 并网逆变器的输出有功功率和电流将存在二次脉动和畸变。为了有效降低并网逆变器对电网的冲击, 提高电网不平衡时并网逆变器并网电流质量, 电网在不平衡情况下时, 研究并网逆变器控制策略成为了迫切的需求。由不同控制目标, 从并网同步算法、正负序分离、电流跟踪控制、谐波补偿和滤波器技术等方面对现有并网逆变器控制策略进行综述。最终, 对不平衡电网情况下并网逆变器及其控制策略发展趋势进行探讨。

关键词

电网不平衡; 并网逆变器; Goertzel 滤波器; 控制策略; 综述

1 引言

实际电网并非理想电压源, 在实际电力系统中存在着大量的单相负载以及系统故障, 会引起三相电网电压的相位和幅值不一致, 也就是三相电网电压不平衡^[1]。一般而言, 产生三相电网电压不平衡的原因主要分为两种^[1-2]: 事故性和正常性。其中事故性是指由系统故障引起的, 包括一相、两相断线、单相接地等。而对于此类故障, 电网一般会设有保护功能, 当事故发生后电网会迅速切除故障源, 保证系统正常运行。本文所指的电网电压不平衡是正常性的电网电压不平衡, 此类不平衡现象主要由三相负荷不平衡和三相输电线路参数不平衡等原因造成。对于不平衡的三相电网而言, 电网电压中不仅有正序分量的存在, 也有负序和谐波分量的存在^[3]。

然而谐波分量与负序分量会对并网逆变器的控制产生不利影响。

本文主要研究电网不平衡情况下并网逆变器的主要控制策略, 针对并网逆变器的锁相环、电流环的设计、参考电流(功率)计算、正负序电压分离、电流控制(功率控制)和LCL滤波器固有的谐振问题等关键技术进行探讨, 浅析并网逆变器控制策略的研究现状, 最后探讨并网逆变器在电网不平衡情况下控制策略的发展趋势。

2 电网不平衡时逆变器的数学模型

如图1示出了采用LCL滤波器的三相并网逆变器^[4], 其中LCL滤波器用于滤除高频开关谐波, LCL滤波器由逆变器侧电感L1、滤波电容C以及网侧电感L2组成, V_{dc} 为直流侧

电源，与单 L 滤波并网逆变器下的电流控制不同的是 LCL 滤波并网逆变器中逆变器侧电感电流和进网电流均可进行控制。由于 LCL 滤波器自身存在谐振尖峰问题，影响并网逆变器的稳定性，为保证并网逆变器稳定工作，需要对该谐振尖峰进行有效阻尼。采用电容电压反馈控制来进行有源阻尼，不仅能够避免电阻上的损耗，而且电路实现也较为简单，因此在 LCL 型并网逆变器中得到广泛应用。

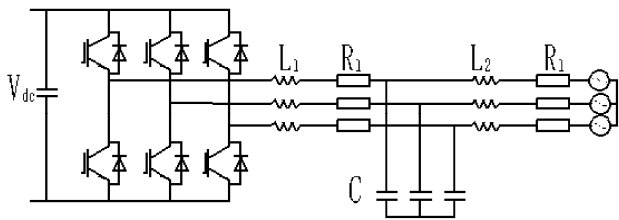


图 1 三相 LCL 并网逆变器电路模型及控制示意图

3 并网逆变器的关键技术

3.1 锁相环技术

如图 2 所示，变采样周期的锁相环^[5]（VSP-LL），该锁相环利用滑动 Goertzel 滤波器可以滤除负序和谐波电压造成的扰动，进而消除了电压非理想型的影响，有利于实现非理想电网下的精确锁相。基于 Goertzel 滤波器的变采样周期锁相环不仅在电网电压不对称和存在谐波的情况下兼顾稳态和动态性能，而且相对于传统的 SRF-PLL，VSP-LL 因其采样周期可以有效反映变换的电网频率，而使其具有更好的电网频率适应性^[6]。

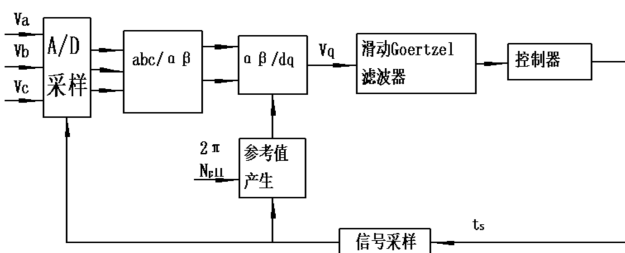


图 2 含滑动 Goertzel 滤波器的基于可变采样周期锁相环的结构框图

3.2 并网电流技术

通过三相逆变器网侧数学模型的建立，得到电网电压不平衡下逆变器的并网电流控制^[8-9]。采取基于正、负 dq 旋转坐标系下的双电流控制方式：分别在不同的旋转坐标系下对电流的正序和负序分量进行控制。因此，在每个旋转坐标系

下实现的都是对直流量的控制，故用 PI 调节器就可以取得很好的稳态和动态性能^[10]。

$$\begin{cases} v_{d(p)}^+ = L \cdot \frac{di_{d(p)}^+}{dt} + e_{d(p)}^+ - wL \cdot i_{q(p)}^+ \\ v_{q(p)}^+ = L \cdot \frac{di_{q(p)}^+}{dt} + e_{q(p)}^+ + wL \cdot i_{d(p)}^+ \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} v_{d(N)}^- = L \cdot \frac{di_{d(N)}^-}{dt} + e_{d(N)}^- + wL \cdot i_{q(N)}^- \\ v_{q(N)}^- = L \cdot \frac{di_{q(N)}^-}{dt} + e_{q(N)}^- - wL \cdot i_{d(N)}^- \end{cases} \quad (2)$$

式（1）和式（2）表示了三相电网电压不平衡时，三相电压和电流的正序、负序分量分别在正、负 dq 旋转坐标系下的网侧数学模型。可以看出，两种 dq 旋转坐标系下均存在 d 轴和 q 轴分量相互耦合的现象，这样给电流的控制增加了难度，故分别对这两种坐标系下的电流环进行解耦控制，实现 d 轴和 q 轴的独立调节^[11]。如下图 3 正 dq 旋转坐标系下的电流环交叉解耦控制框图和图 4 基于双 dq 旋转坐标系下的电流环控制框图。

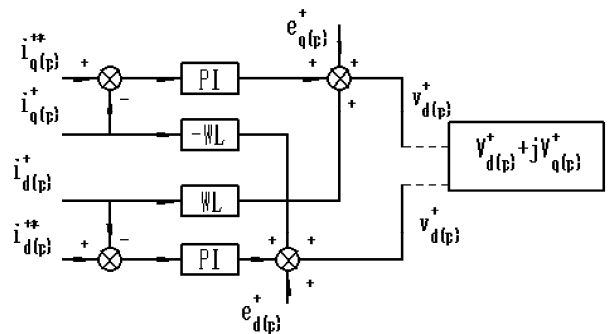


图 3 正 dq 旋转坐标系下的电流环交叉解耦控制框图

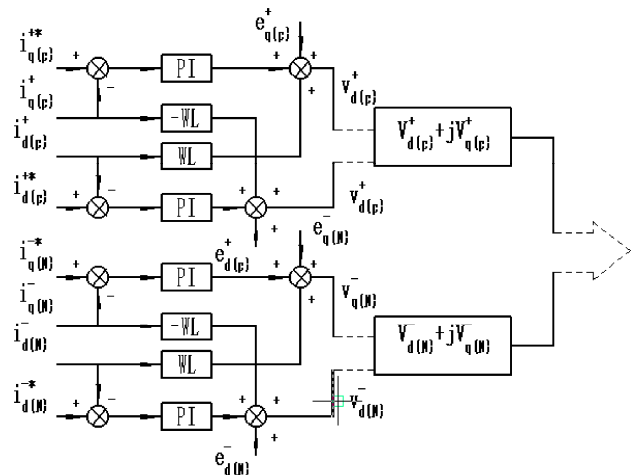


图 4 基于双 dq 旋转坐标系下的电流环控制框图

3.3 参考电流的计算

电网不平衡情况下参考电流(功率)可根据瞬时功率法进行计算^[12]。P. Rodnguez 等人根据不同的控制目标,确定五种不同的瞬时功率表达式和相应的参考电流表达式。根据这些控制策略,无法同时实现抑制有功、无功波动和消除注入电流谐波两种控制目标^[13]。文献^[14]提出协调控制的方法,对五种控制策略采用统一的参考电流表达式,通过设置参数取得不同控制目标之间的平衡,使控制性能达到最优。瞬时功率法根据瞬时功率理论,通过求取有功、无功,有功、无功二次波动的表达式,依照不同的控制目标求取参考电流^[14]。

$$S = P + jQ = (e^{j\omega} E_{dq}^+ + e^{-j\omega} E_{dq}^-)(e^{j\omega} I_{dq}^+ + e^{-j\omega} I_{dq}^-)^* \quad (3)$$

控制目标(3)为负序电流为零, $I=0$, 抑制电流谐波。

$$P(t) = P_0 + P_{c2} \cos(2\omega t) + P_{s2} \sin(2\omega t) \quad (4)$$

控制目标(4)为保持并网有功功率恒定,抑制有功功率二脉动,即 $P_{c2} = P_{s2} = 0$ 。

$$Q(t) = Q_0 + Q_{c2} \cos(2\omega t) + Q_{s2} \sin(2\omega t) \quad (5)$$

控制目标(5)为保持无功功率恒定,即 $S_{c2} = S_{s2} = 0$, 或者电网单位功率因数运行, $Q=0$ 。文献^[15-16]中提出考虑输出电流质量和功率恒定两个控制目标之间无法同一控制策略兼得的问题,提出一种协调控制方案,通过调整参数,而达到两种控制目标之间的协调。

3.4 电容电压反馈

利用电容电压反馈来虚拟阻尼电阻的有源阻尼,采用微分反馈可以实现很好的有源阻尼效果^[17-18],如图5所示。微分反馈一方面很好地抑制了低频区增益,提取了电容电压中的较高频率分量,另一方面实现了 90° 的相位超前。

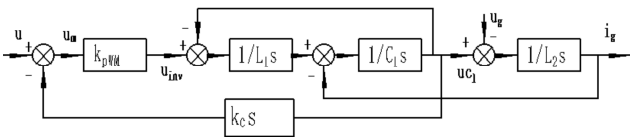


图5 基于电容电压反馈的有源阻尼控制框图

4 下一步研究重点及意义

关于在电压不平衡时并网逆变器控制的研究还在不断完善中,其技术手段还有待提高,因此电压不平衡时并网逆变器的控制技术研究仍有广泛发展空间和研究意义。

(1)快速的电网故障检测技术是实现电网不平衡情况下并网逆变器控制的一项关键技术,其决定了并网逆变器故障时的动态性能。

(2)将风力发电、光伏发电等独立分布式发电系统组成微电网后,各个发电装置在电网发生故障时存在一定的相互影响,这需要对多机组成的系统整体考虑,对电网正常状态下的并网逆变器控制算法做进一步优化,提高整个分布式发电系统的低电压穿越能力。

(3)大功率并网逆变器中,为克服传统L滤波器增加控制系统惯性,电感压降增加而导致直流侧电压增加,通常采用LCL滤波器。但是LCL滤波器是一个三阶多变量系统,给控制系统设计提出了更高的要求。如果直接采用典型的并网电流闭环的控制策略,系统不稳定且不利于功率开关的保护。

5 结语

本文针对不平衡电网情况下并网逆变器控制策略,从参考电流计算、电流环控制、正负序分量提取、谐波电流补偿和LCL滤波器阻尼控制等角度进行了综述。探讨了不平衡电网下先进并网逆变器控制策略应具备的控制功能和控制策略的研究方向,对并网逆变器的研究具有一定的参考意义。

参考文献

- [1] 陈炜,艾欣,吴涛,刘辉.光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J].电力自动化设备,2013,(02):26-32+39.
- [2] 赵新,金新民,周飞.基于比例积分-降阶谐振调节器的并网逆变器不平衡控制.中国电机工程学报,2013,33(19):84-92.
- [3] 陈轶涵,任磊,邓翔,龚春英.一种基于3次谐波注入的并联三相四桥臂逆变器均流控制策略[J].电工技术学报,2016,(04):104-113.
- [4] 吴恒,阮新波,杨东升.弱电网条件下锁相环对LCL型并网逆变器稳定性的影响研究及锁相环参数设计[J].中国电机工程学报,2014,(30):5259-5268.
- [5] 陆原,汪周玮,郭素兵.基于单二阶广义积分器的三相数字锁相环设计[J].电测与仪表,2015,52(6):96-101.
- [6] Pan D,Ruan X,Bao C,et al.Capacitor-current-feedback active damping with reduced computation delay for improving robustness of LCL-type grid-connected inverter[J].IEEE Trans.on Power Electronics,2014,29(7):3414-3427.

- [7] Arzani A, Arunagirinathan P, Venayagamoorthy G K. Development of Optimal PI Controllers for a Grid-Tied Photovoltaic Inverter[C]. IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications in Smart Grid. IEEE, 2015.
- [8] Sun X, Fan T, An S, et al. An improved grid-connected photovoltaic power generation system with low harmonic current in full power ranges[C]. Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), 2014 International. IEEE, 2014: 423-428.
- [9] 陈妹慧, 王红梅, 陈新. 基于电网电压前馈的三相 LCL 并网逆变器电流控制方法研究 [J]. 电气工程学报, 2016, (01): 24-31.
- [10] Li J, Huang A Q, Liang Z, et al. Analysis and design of active NPC (ANPC) inverters for fault-tolerant operation of high-power electrical drives [J]. IEEE Trans. On Power Electronics, 2012, 27(2): 519-533.
- [11] 郭小强, 张学, 卢志刚等. 不平衡电网电压下光伏并网逆变器功率/电流质量协调控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014(3): 346-353.
- [12] Mirhosseini M, Pou J, Agelidis V G. Individual Phase Current Control With the Capability to Avoid Overvoltage in Grid-Connected Photovoltaic Power Plants Under Unbalanced Voltage Sags [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10): 5346-5351.
- [13] 唐婷, 石祥花, 黄如海, 许津铭, 谢少军. 非隔离型光伏并网逆变器漏电流抑制机理分析与改进 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 25-31.
- [14] 周皓, 童朝南, 刘宝其等. 电网不平衡条件下的光伏并网发电控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 27-32.
- [15] Shen H, Zhang Y, Shi Y L, et al. Research on control strategy of three-phase Grid-connected inverter under distorted and unbalanced voltage conditions [C]. Transportation Electrification Asia-Pacific. IEEE, 2014: 1-6.
- [16] 刘国旺, 戴瑜兴, 刘国清, 等. 三相逆变控制系统建模仿真与谐波分析 [J]. 电力电子技术, 2014, 48(9): 74-76.
- [17] 许津铭, 谢少军, 张斌峰. LCL 滤波器有源阻尼控制机构研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 27-33.
- [18] Loh PC, Tang Y, Blaabjerg F, et al. Mixed-frame and stationary-frame repetitive control schemes for compensating typical load and grid harmonics [J]. IET Power Electronics, 2011, 4(2): 218-226.