

微网双向变流器的改进型重复控制技术研究

张继元, 舒 杰, 黄 磊, 姜桂秀

(中国科学院广州能源研究所, 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 广东 510640)

摘要:为减小电网电压不平衡对系统的影响, 设计了三相独立可控的 SPWM 双向变流器, 采用重复控制技术, 它可作为一个整体也可单独进行控制。提出基于重复控制技术与瞬时值反馈相结合的改进型控制策略, 对系统稳定性进行分析并设计补偿函数, 分析结果表明改进的重复控制策略能够在降低稳态跟踪误差和总谐波畸变率(THD)的同时, 动态性能提高。实验结果证明改进型重复控制策略的有效性和可行性。

关键词:变流器; 微电网; 重复控制

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2015)01-0079-03

Research on Improved Repetitive Control Applied on Microgrid Bidirectional Converter

ZHANG Ji-yuan, SHU Jie, HUANG Lei, JIANG Gui-xiu

(Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion,
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to reduce the influence of the three phase voltage unbalance of power grid system, a three-phase independent controllable SPWM bidirectional converter is designed. It can be used as a whole and can also separate control. Based on repetitive control technique and combined with instantaneous value feedback method, an improved control strategy is put forward, the stability of the system are analyzed and designed the compensation function, the analysis results show that the improved repetitive control strategy can reduce steady-state tracking error and THD, the dynamic performance is improved. Experimental results prove the effective and feasibility of the modified repetitive control strategy.

Keywords: converter; microgrid technology; repetitive control

Foundation Project: Supported by Guangdong Province High Tech Zone Pilot Project (No.2112B0900023); Guangzhou Key Science & Technology Special Project (No.2010U1-D00231)

1 引言

微电网技术可充分利用可再生能源, 将分布式发电和负载连接起来, 组成区域电网, 实现可再生能源发电的自产自销, 减少能量传输损耗, 促进可再生能源发电大规模应用^[1]。微电网按其运行模式分为并网和孤岛^[2]模式。无论在何种模式下, 由于可再生能源及负载用电需求的波动性和随机性等特点, 对微电网运行控制提出较高要求^[3]。由于电网电压中谐波成分属于周期性固定干扰源, 因此, 引入重复控制方法是改进变流器的控制性能的方法之一, 重复控制与 PI 控制相结合的复合控制方法在变流器中广泛应用^[4-5]。此处提出一种

基于重复控制技术与瞬时值反馈相结合的改进型控制策略, 对改进的系统稳定性进行了分析, 设计适合该变流器的补偿函数, 使之在降低稳态跟踪误差和 THD 的同时, 能够满足良好的动态性能。

2 双向变流器体系结构

当微电网并网运行时, 分布式能源根据调度指令, 跟踪电网电压进行并网控制运行, 双向变流器及其储能装置对配电网进行补充作用。孤岛运行时, 双向变流器配合调度指令, 通过双向变流器调节作用, 使功率实现双向流动, 建立一个稳定的微电网系统, 维持电网电压的幅值和频率在允许范围内, 为实现并网与孤岛运行模式的平滑切换, 变流器需对配电网进行检测。

由此可见, 变流器是微电网的核心组网装置, 也是提高可再生能源发电微电网运行效率与可靠性的关键技术之一^[6]。在微电网中, 三相负载的不平衡程度及非线性程度在较大电网中更明显, 因

基金项目: 广东省高新区引导项目(2112B0900023); 广州市重大科技专项(2010U1-D00231)

定稿日期: 2014-03-13

作者简介: 张继元(1990-), 男, 江西人, 硕士研究生, 助理研究员, 研究方向为可再生能源发电及微网技术。

此双向变流器应具有同时向平衡/不平衡电网,及线性/非线性负载供电的能力。微电网中储能型变流器直流侧通常接蓄电池组,蓄电池单体性能差异使直流母线电压不宜过高,采用 3 个单相全桥经变压器耦合成三相变流器,三相整流拓扑结构上基本实现了三相电压解耦,直流电压利用率高,在微电网运行工况较恶劣时具有较大的实用价值,并可根据需要组建单相/三相微电网,经综合考虑,这里采用此拓扑结构。

在图 1 所示的双向变流器结构中,初级为 3 个单相全桥电路,次级采用 Y 形接法,滤波电感和输出变压器采用一体化三磁柱铁心结构。双向变流器工作在三相对称可控整流状态,要求在平衡/不平衡、线性/非线性负载下保持高质量电压参考,控制要求较高。

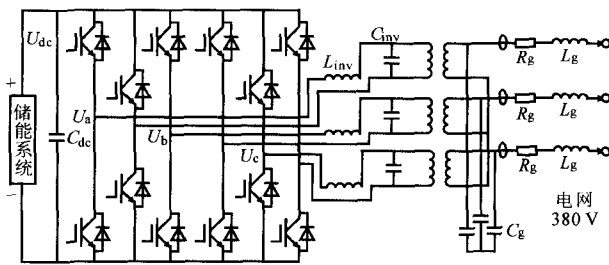


图 1 双向变流器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the bidirectional converter

双向变流器采用正弦脉宽调制 (SPWM), L_{inv} , C_{inv} 是三相滤波电感和滤波电容,连接到配电网线路的电阻和电感、电容分别为 R_g, L_g, C_g , 变流器输出电流为 i_{inv} , 滤波电容电流为 $i_{C_{inv}}$, 流向配电网电流为 i_g , 变流器三相输出电压为 U_a, U_b, U_c , 直流侧储能装置电压为 U_{dc} , 通过改变参考电流控制功率双向流动。

3 改进型重复控制策略

3.1 重复控制基本原理

重复控制是一种基于内模原理的控制策略。内模原理意味着若在稳定的闭环系统中含有参考指令的信号发生器,被控输出就可以无稳态误差地跟踪这组参考指令。图 2a 示出重复控制器框图, E 为瞬时电压误差信号; z^{-N} 为周期延时环节。

在应用中其内模离散形式为:

$$G_c(z) = [1 - Q(z)z^{-N}]^{-1} \quad (1)$$

这可视为是一种对信号周期性的积分,其中 N 为一个周期采样次数, $Q(z)$ 为小于 1 的积分衰减系数,例如当 $Q(z) = 0.85$ 时,波特图见图 2b。

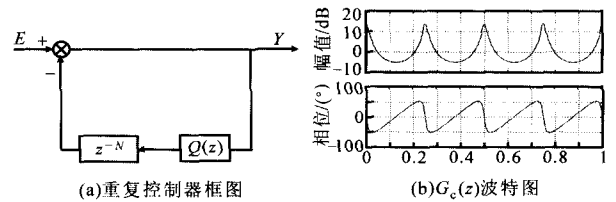


图 2 重复控制器框图及波特图

Fig. 2 Repetitive control system structure and Bode diagram

根据稳定性判据和图 2b 所示频率特性可知,本身不存在稳定性问题,然而在实际应用中,通常采用图 3 所示的控制器框图。其中 $S(z) = \alpha z^k s(z)$, α 为比例系数,最终确定输出量幅值;超前环节 z^k 的作用是在 z^{-N} 存在的条件下,使控制器根据上一周期的误差信息在下一周期提前 k 拍发出校正量,用于补偿相位延迟; $s(z)$ 为针对控制对象设计的补偿函数,通常使用二阶低通滤波器,或者为陷波滤波器和二阶低通滤波器的组合。

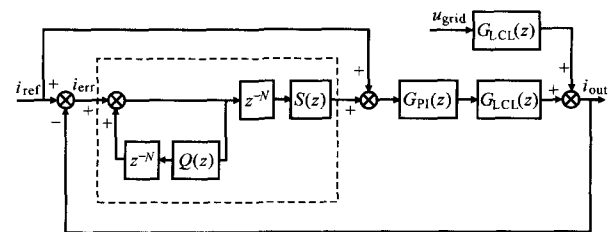


图 3 改进的重复控制示意图

Fig. 3 The diagram of improved repetitive control strategy

3.2 改进重复控制系统设计

重复控制环节对周期性重复扰动信号具有较高增益,然而也存在较大的控制滞后,重复控制器按周波调节的特点使其动态响应速度慢;PI 控制器与重复控制器并联的控制策略恰好能弥补其缺陷,由 PI 控制器快速调节系统,而由重复控制器负责对控制指令进行微调,保障系统稳态精度。故采用重复控制与瞬时值 PI 控制结合的策略,能够提高系统抑制低频谐波能力,取得较好的动态响应。图 3 中虚线框中为重复控制器,它包括重复信号发生器、单位延迟、补偿滤波器,重复控制输出加在 PI 给定值上。

3.3 系统稳定性分析及补偿函数的设计

上述控制策略要求保持系统稳定性,则对重复控制器中补偿函数 $S(z)$ 的设计提出不同要求。闭环传递函数为:

$$\frac{i_{out}(z)}{i_{ref}(z)} = \frac{[1 - z^{-N}[Q - S(z)]]M}{1 - z^{-N}[Q - S(z)M]} \quad (2)$$

式中: $M = [KG_N(z)G_{LCL}(z)]/[1 + KG_N(z)G_{LCL}(z)]$ 。

令 $P(z)=M$, 根据其特征方程可得系统稳定的充分条件:

$$|Q-S(z)P(z)| < 1, z = e^{j\omega T_s}, \omega \in [0, \pi/T] \quad (3)$$

式中: T_s 为系统采样时间; $P(z)$ 为重复控制器等效控制对象。

为满足系统稳定性条件, 需根据 $P(z)$ 的特性来设计补偿函数 $S(z)$, $Q(z)$ 按照工程经验值取 0.95。函数特性曲线如图 4 所示, 其中 $P(z)$ 低频段具有零增益零相移的特性, 无需补偿; 在 $P(z)$ 谐振频率处的相移较大, 故需要使用零相移的梳状滤波器对谐振点附近的幅度进行衰减; 在 $P(z)$ 谐振频率以上的高频段, 需引入二阶滤波器对幅度进行足够的衰减; 最后在 $P(z)$ 谐振频率以下的中频段, 需采用超前环节 z^x 进行补偿, x 值取决于 $P(z)$ 和二阶滤波器的合成相移大小(由于重复控制中控制信号滞后一个工频周期, 所以在这里超前环节能够实现)。基于以上分析, 针对 $P(z)$ 在采样频率为 9.6 kHz 时设计的补偿函数:

$$S(z) = \frac{z^8 + 2z^{-8}}{4} \cdot \frac{0.1813z + 0.1551}{z^2 - 1.294z + 0.63} z^9 \quad (4)$$

这种形式的补偿函数可在满足稳定性要求的同时保证 $P(z)S(z)$ 在工频谐波的频率处仍具有足够高的增益。

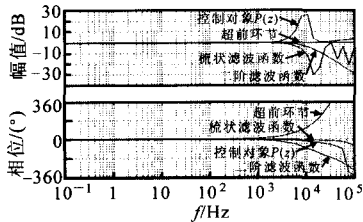


图 4 补偿函数特性曲线

Fig. 4 Characteristic diagrams of compensation function

4 实验验证

根据组网及运行控制需要, 双向变频器可在逆变或整流状态。双向变频器的控制可简化为 3 个单相逆变器的控制, 三相具有相同的控制结构。变频器的控制主要分为锁相控制和电压波形控制两部分。a 相电压参考正弦表正向过零点与同步脉冲上升沿的相角差, 进行比例运算后调整 PWM 波的周期值, 实现两者零相差锁相, b 相和 c 相的参考电压波形可将 a 相电压参考正弦表依次延时 120° 和 240° 得到。

进行了 3 kVA 双向变频器实际开发, 采用 TMS320F28335 型 DSP, 三相电路对称, 因此主电路参数中电感 $L_a=300 \mu\text{H}$, 电容 $C_a=200 \mu\text{H}$, SPWM 波调制频率为 9.6 kHz, 波形参考正弦表一个周期

离散为若干点, 重复控制器参数 $N=192$ 。图 5 为并网状态下, 双向变频器向电网提供 3 kW 功率时的 a 相电压电流波形。由图可见, 电网电压 u_{grid} 的有效值稳定在 230 V, 直流侧母线电压 U_{dcbus} 稳定在 400 V, 系统失真度较低, 约为 2.3%。可见采用图 3 所示控制策略具有较好的控制效果, 能够使双向变频器在蓄电池电压波动及负载变化条件下, 提供良好的供电质量。

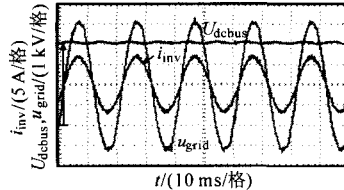


图 5 双向变频器并网波形

Fig. 5 On-grid waveforms of bidirectional converter

5 结论

提出一种工程实用的微网双向变频器拓扑结构, 并阐述了该结构应对三相电网电压不平衡时的优势。针对重复控制和 PI 控制的优缺点进行分析, 结合两者提出了改进重复控制策略, 并对系统稳定性进行分析, 设计系统的补偿函数。同时, 采用 TMS320F28335 型 DSP 控制芯片, 搭建 3 kVA 的双向变频器实验平台, 测试结果表明在可再生能源发电及负荷用电波动及间歇性的条件下, 系统仍然能够维持稳定, 保证较低的稳态跟踪误差和失真度, 验证了控制策略的有效可行。

参考文献

- [1] Sangmin J, Youngsang B, Sewan C, et al. A Low Cost Utility Interactive Inverter for Residential Fuel Cell Generation[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2007, 22(6): 2293-2298.
- [2] 周龙华, 舒杰, 张先勇, 等. 分布式能源微网电压质量的控制策略研究[J]. 电网技术, 2012, 10(10): 17-22.
- [3] Reigosa D, Arbolea P, Gonzalez Moran, et al. An Improved Control Scheme Based in Droop Characteristic for Microgrid Converters[A]. International Conference on Electrical Machines and System[C]. 2009: 1-6.
- [4] 滕国飞, 肖国春, 张志波, 等. 采用重复控制的 LCL 型并网逆变器单闭环电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 13-21.
- [5] 王斯然, 吕征宇. LCL 型并网逆变器中重复控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 69-75.
- [6] Teodorescu R, Liserre M, Rodriguez P. Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems [M]. New Delhi, Wiley-IEEE Press, 2011.