

基于分布式发电的不对称电压调节器仿真

干磊, 吴政球, 曾议, 张超, 朱文慧

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 针对本地不对称的三相负荷所引起的公共连接点(PCC)三相电压不对称, 提出了基于分布式发电的不对称电压调节器的设计, 将三相不对称电压的调节统一于分布式发电系统中, 在并网的情况下实现了负荷不对称时PCC点电压的调节。采用的是功率电流双环控制策略的逆变控制系统, 通过合理的选取功率控制环, 电流控制环, PI控制器参数, 可以使得分布式发电逆变装置在两种情况下具有良好的电压调节稳态及动态性能。利用Matlab/Simulink对系统进行仿真, 验证了所提系统结构及控制策略设计的可行性。

关键词: 分布式发电; 电压不对称; 电压调节; 逆变控制

Distributed power generation based asymmetric voltage regulator simulation

GAN Lei, WU Zheng-qiu, ZENG Yi, ZHANG Chao, ZHU Wen-hui

(Electrical and Information Engineering College, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In view of the three-phase local asymmetry caused by load of public access point (PCC) three-phase voltage asymmetry, this paper proposes distributed power generation-based asymmetric voltage regulator design. Three-phase voltage regulator is integrated in distributed power systems to realize unsymmetrical load voltage regulation at PCC in parallel network. This paper is based on current dual-loop control power inverter control strategy control system, and reasonably selects power control ring, the current control loops, and PI controller parameters, by which distributed power generation network devices inverter voltage regulator has good stability state and dynamic performance. And using Matlab / Simulink simulation of the system, it verifies the feasibility of the system structure and control strategy design.

Key words: distributed power grid; voltage asymmetry; voltage regulator; inverter control

中图分类号: TM61 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)17-0035-05

0 引言

在实际分布式发电系统中由于系统中日益增多的不对称负荷的影响, 三相电压并不总是对称的。三相电压不平衡度是衡量电网电能质量的一个重要指标。随着人们对电能质量要求的提高, 电压不平衡问题正受到越来越多的关注^[1]。IEEE和IEC均对电压不平衡度的定义、最大允许值等做了明确的规定。我国国家技术监督局颁布的国家标准GB/T 15543—1995《电能质量三相电压允许不平衡度》中规定, 电力系统公共连接点PCC(Point of Common Coupling)正常电压不平衡度允许值为2%, 短时不得超过4%。文献[1]表明, 大约有10%的配电系统电压不平衡度大于等于3%。三相电压不对称除了导致电动机绕组过热, 过载能力或效率降低, 变压器和传输线损耗增加, 换流器过电流等问题外, 还会对一些连接在系统中的敏感负荷(即对供电电压幅值、

相位或者两者变化都非常敏感的负荷)产生不利影响, 降低产品质量并造成额外的经济损失^[2]。

在逆变控制策略研究过程中, 一般均假设三相电网是平衡的。而实际上, 三相常处在不平衡状态, 即三相电压的幅值, 相位不对称^[3,4]。一旦电网不平衡, 以三相平衡为约束所设计的逆变器就会出现不正常的运行状态。主要表现在: 逆变器输出电压和电网电流的低次谐波幅值增大; 且产生非特征谐波, 同时损耗相应增大; 网侧的电压亦不平衡, 严重时可使逆变装置发生故障, 甚至烧坏装置。

本文主要针对本地不对称的三相负荷所引起的公共连接点(PCC)点三相电压不对称设计了基于分布式发电系统的不对称电压调节器, 将三相不对称电压的调节统一于分布式并网系统中, 在并网情况下实现PCC点电压不对称的调节。本文采用的是功率电流双环控制策略的逆变控制系统, 通过合理地选取功率控制环, 电流控制环, PI控制器参数,

可以使得分布式发电并网逆变装置具有良好的电压调节稳态及动态性能。理论推导和仿真分析验证了本文思想的正确性。

1 分布式发电系统电压调节器结构

分布式电源并网是指分布式发电 DG (distributed generation)与区域电网建立相应的物理连接。图 1 所示的是低压配电网中的逆变型分布式电源的并网结构图, 分布式发电装置整流或直接产生直流电能, 通过逆变器接口和 LC 滤波器后, 将直流电转化为工频的交流电能, 并经过并网隔离变压器并入电网中的公共连接点(PCC)^[5]。

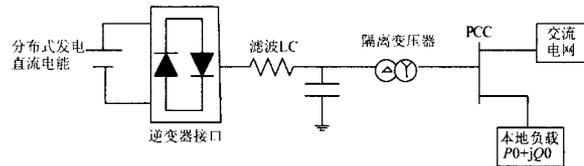


图 1 并网逆变接口的等值结构图

Fig.1 Equivalent chart of network interface

为了使逆变器在电网不平衡条件下仍能正常工作, 在并网的情况下具有良好的电压调节稳态及动态性能, 设计了基于分布式发电系统的不对称电压的调节器。此分布式发电系统电压调节器的控制结构如图 2 所示。它是由旋转坐标变换, 电压治理, 功率计算, 功率控制, 电流控制, 逆变驱动信号发生, 逆变桥, 输出滤波器, 隔离变压器, 以及电网这几部分组成的。在公共连接点 (PCC) 检测出来三相不对称的电压, 导致电压不对称的原因主要是电网的负序分量, 通过 Park 变换的电压检测方法除去负序电压分量得到三相对称的电压, 再把它送给功率跟踪计算得到电流环的参考输入值。从而在实现并网的基础上对不对称电压调节。

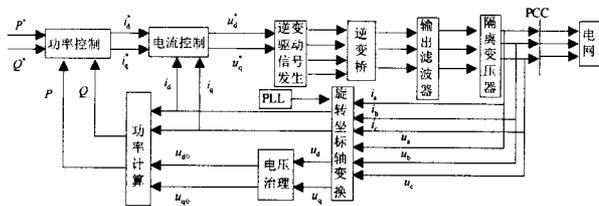


图 2 系统控制结构框图

Fig. 2 System control structure diagram

1.1 不对称电压的检测

电压治理部分主要解决电网不对称电压与谐波等电压质量问题, 其响应速度要求较快, 因此对电压检测和控制实现的快速性和准确性要求很高。本文采用了一种以广义瞬时无功理论为基础, 改进的

检测方法其原理如图 3 所示。三相标准电压经过 Park 变换后, 在 d,q 轴上表现为直流分量, 变换如下:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = C_{dq0} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = C_{dq0} \begin{bmatrix} \sqrt{2}U \sin(\omega t + \varphi) \\ \sqrt{2}U \sin(\omega t - 2\pi/3 + \varphi) \\ \sqrt{2}U \sin(\omega t + 2\pi/3 + \varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}U \sin[(\omega - \omega_1)t + \varphi] \\ -\sqrt{3}U \cos[(\omega - \omega_1)t + \varphi] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:

$$C_{dq0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ -\sin \alpha & -\sin(\alpha - 2\pi/3) & -\sin(\alpha + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

由公式 (1) 的结果可知当 $\omega_1 = \omega$, $\varphi = 0$ 时, d 轴的直流分量为 0, q 轴的直流分量为 $-\sqrt{3}u$ 。此公式对于任意三相电压信号经上述变换后, 在 q 轴上加 $\sqrt{3}u$ 就相当于减去了三相标准的正弦基波, 剩下部分经过 Park 反变换后就是包含电压不对称, 升高, 降落, 瞬变, 谐波情况下的补偿值。然后再用原来的三相不对称的电压减去其检测出来的补偿值就可以得到三相对称的电压。此方法不仅适用于三相不对称电路, 还适合于非正弦的三相电路, 可有效地检测出三相电压跌落、不对称、升高、降落、瞬变、谐波情况下的补偿值, 并克服了以往检测方法中两次使用滤波器所带来的延时, 大大提高了实时性^[6]。该方法易于用电路和编程实现。

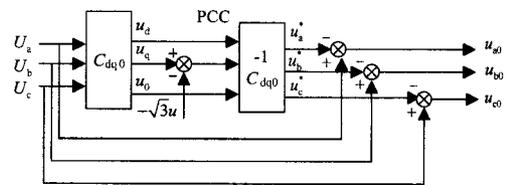


图 3 电压检测原理框图

Fig.3 Diagram of detection of harmonic voltage

电压治理调节器采用反馈控制方法, 控制原理如图 4 所示, U^* , U 分别为补偿和网侧电压。

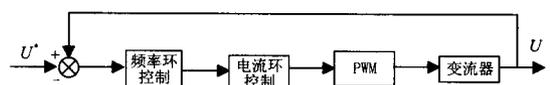


图 4 电压治理控制原理框图

Fig. 4 Voltage control block diagram

1.2 功率控制环的设计

理论上逆变系统在稳态时输送的功率由等值的电流源吸收, 从而只需对电压型逆变器进行电流调节就可以完成逆变器相应功率控制的目标^[6]。视应用不同, 可以选用瞬时功率或平均功率方法参与调节。由于瞬时功率控制方法输出的电流质量完全受电网电压的影响, 当电网电压受干扰时, 电流波形将会畸变, 而平均功率控制方法能提供高品质的正弦输出电流, 本文主要通过功率环对电流环的调节使逆变器输出补偿的电压从而达到系统对电压的调节, 本仿真系统中使用平均功率控制^[5]。

所谓平均功率控制, 是在旋转坐标系下的功率计算, 可以由式(2)表示。

$$P = u_d i_d + u_q i_q$$

$$Q = u_d i_q - u_q i_d \quad (2)$$

在功率和电压已知的前提下可求得电流值, 如式(3)所示

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d & u_q \\ -u_q & u_d \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过式(2)、式(3)可以看出, 如果输出功率 P 和 Q 以及输出电压已知, 可以精确地计算出下级PI控制器的参考电流值, 如图5所示, 产生的 i_{ref} 作为电流环的参考输入, 此处PI控制器的使用可实现无差控制^[5]。

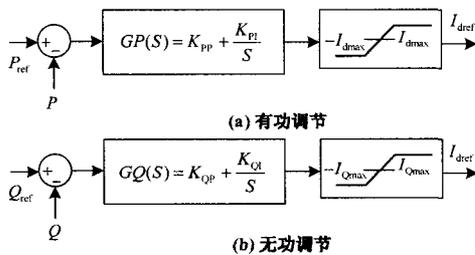


图5 PI功率调节控制框图

Fig.5 PI control diagram for power regulation

1.3 电流控制环的设计

对于并网逆变器来说, 必须要对输出滤波器电感上的电流进行控制, 消除逆变器的开关和外部扰动产生的谐波等。功率控制外环作用产生内电流环所需的电流参考值 i_{ref} , 电流控制环采用PI控制器, 将电流参考值与实际反馈回控制器的电流信号进行比较, 并根据差量迅速进行调节, 产生零稳态误差作用, 从而可以补偿非线性扰动。

电流环的PI调节过程中, 若电流控制误差为0,

逆变器的输出电流根据功率环给出的参考值保持恒流电流调节, 从而保证了输出电压及时跟踪导通参考波, 使得输出电流更接近正弦波, 无直流或零序分量; 也使得逆变器系统对三相负荷不平衡以及谐波不敏感, 使分布式电源具有灵活运行的能力。电流环的PI控制结构如图6所示。

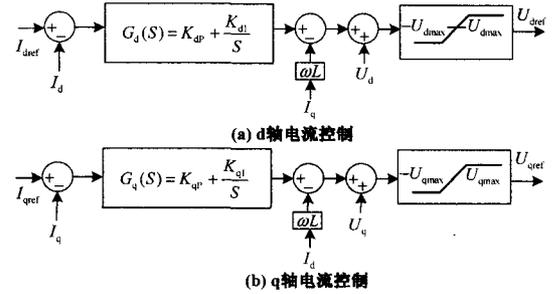


图6 电流环PI控制框图

Fig. 6 PI block diagram for current loop control

2 仿真研究

根据本文提出的基于分布式发电系统的不对称电压的调节器仿真结构和控制策略, 并利用Matlab/Simulink进行仿真研究。针对图1的系统模型, 引入本地不对称的负荷, 采用的是含有RLC并联负载。其它都是三相对称负荷的情况下, 其主要参数如下: 分布式电源采用的3 000 V的直流电源, 滤波后输出的线电压为1 kV经过隔离变压器的升压并入公共点PCC处, 变压器采用 $\Delta \rightarrow Y$, 升压变比为1: 10, 所有的线路阻抗为0.1 Ω , 1 mH。电网的线电压为10.5 kV, 在升压变压器与PCC之间接入三相不对称本地负荷, 选择其不对称程度为20%作为仿真实验, 其A相为2 MW, 1 Mvar, B相为2.4 MW, 1.2 Mvar, C相为2.88 MW, 1.44 MW。电网所接的负荷分别为对称三相负载, 分别为2 MW, 1 Mvar, 1.5 kW, 0 var, 1 MW, 1 Mvar。分布式电源的功率选用5 150 Hz的开关频率。在本结构设计中都是使用标么值, 电压的基准值是10 kV。并网与电压的调节的参数如下所示:

电压治理中的检测部分采用的是Park检测, $\sqrt{3}u$ 为1;

功率控制环采用平均功率控制, 其PI控制参数:

$$K_{Pp} = K_{Qpp} = 0.5$$

$$K_{Pi} = K_{QPi} = 20$$

电流控制环的PI控制参数:

$$K_{dp} = K_{qp} = 0.8$$

$$K_d = K_q = 10$$

输出滤波器 LC参数：

$$L = 1 \text{ mH}, C = 70 \text{ } \mu\text{F}$$

隔离变压器的参数

$$\Delta_0 \rightarrow Y: 1 \text{ kV} / 10 \text{ kV}, 2.5 \text{ MVA}$$

$$r_T = 1\%, X_T = 4\%$$

2.1 并网电压调节结果

由于系统是三相不对称的负荷，逆变器输出电压的低次谐波幅值增大；且产生非特征谐波，PCC点电压不对称。仿真结果如图所示，其中图7分别为逆变器输出电压的频谱图，图8和图9、图10分别为所提调节器投入前与投入后的PCC的三相相电压图，以及所提调节器投入后的电网电压频谱图。

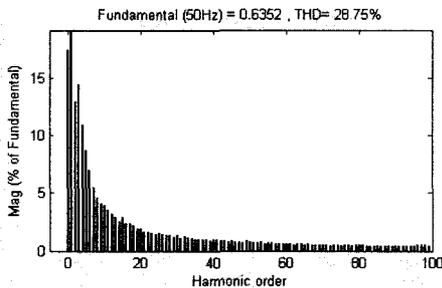


图7 没有本文电压调节器时逆变器输出电压频谱图

Fig. 7 Spectrum at the AC side of inverter without the proposed voltage regulation

从图7中可以看出由于本地负荷的不对称，所引起逆变器输出电压所含低次谐波幅值增大，并产生许多非特征谐波。再根据图8、9、10比较可以看出采用本文调节器后PCC点电压的不平衡度明显降低，而且使得电网其它各点的电压都能随之达到平衡，电压波形所含谐波明显减少，提高了用户电压质量。达到了很好的动态调压效果，实现了调节电网电压功能，验证了本文所提出的设计方法的有效性。

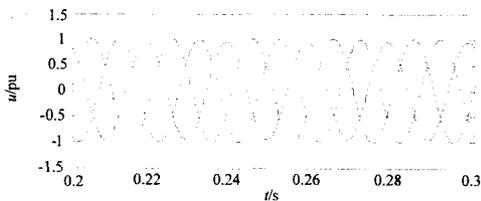


图8 没有本文电压调节器时PCC点电压

Fig. 8 PCC voltage without the proposed voltage regulator

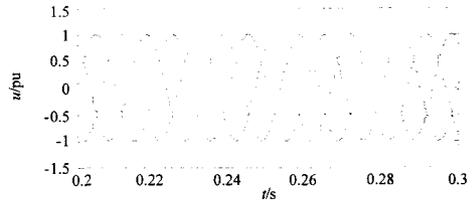


图9 采用本文电压调节器时PCC点电压

Fig.9 PCC voltage with the proposed voltage regulator

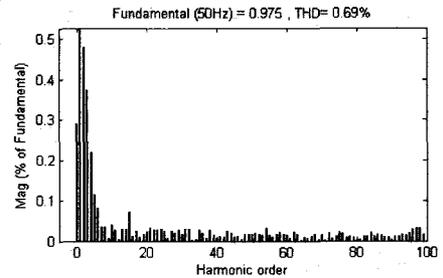


图10 采用本文电压调节器时电网电压频谱图

Fig.10 Spectrum of the proposed voltage regulator to the main system

另外根据负荷的不平衡度的大小，得出逆变器的输出的容量随着负荷的不平衡的增大而增大，由表1中可以得到验证。（其基准值为1 MW）

表1 逆变器输出的容量与负荷不平衡度的关系

Tab.1 Relationship between inverter output capacity and load

imbalance

负荷不平衡度	逆变器输出最大有功 P/pu	逆变器输出最大无功 Q/pu
0	5.8	4.5
5%	6.1	4.6
10%	6.5	4.9
15%	6.9	5
20%	7.2	5.1

当逆变器输出的有功和无功分别为5.8 MW, 4.5 MW，负荷的不平衡为20%时的三相相电压的仿真图如图11。

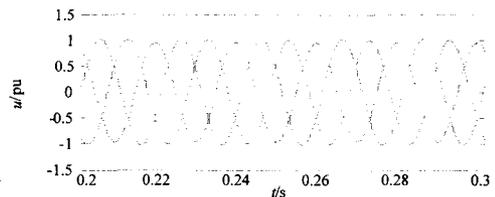


图11 逆变器输出容量不足时的PCC点电压

Fig. 11 PCC voltage when the inverter output capacity is low

从图11中可以看出,当逆变器电源输出的容量不足时,对不对称电压的调节效果不佳。没有达到使电压三相完全对称的效果。在文献[4,7]中也可以得出随着分布式电源的容量的增大对不对称电压的改善程度越好。

3 结论

针对日益增加的三相不对称负荷对分布式发电系统的不利影响,本文实现了基于分布式发电的不对称电压调节器的仿真。在并网情况下实现了电压对称调节,使得分布式发电逆变装置具有良好的电压调节稳态及动态性能。并利用 Matlab/Simulink 对系统进行仿真,结果表明所设计的电压调节器针对电压三相不对称问题有明显的改善作用,有力保证了用户对电压质量的要求。可以加以推广与应用。

参考文献

- [1] Jouanne A, Banerjee B. Assessment of Voltage Unbalance[J].IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16 (4): 782-790.
- [2] 赵剑锋,蒋平,唐国庆.基于电压型逆变器的可持续运行的动态电压恢复器(UDVR)的研究[J].电工技术学报,2002,17(3):88-92.
ZHAO Jian-feng, JIANG Ping, TANG Guo-qing. Research on VSI-based Uninterrupted Dynamic Voltage Restorer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(3): 88-92.
- [3] 杨杰,赖声礼,李心广,等.三相电压不对称时谐波与基波有功、无功电流的精确检测方法研究[J].继电器,2003,31(4):6-9,20.
YANG Jie, LAI Sheng-li, LI Xin-guang, et al. Research on Precision Detection Method of Harmonics, Fundamental Active Current and Reactive Current in the Case of Unsymmetrical Three Phase Voltage[J]. Relay,

- 2003, 31(4):6-9,20.
- [4] 白丹,蔡志开,彭力.三相逆变电源不平衡负载研究[J].电力系统自动化,2004,28(9):53-57.
BAI Dan, CAI Zhi-kai, PENG Li. Study on Unbalanced Load of a Three Phase Inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(9): 53-57.
- [5] 何建剑,吴为麟.分布式电源并网系统的研究[J].研究与探讨,2007,(3):1-6.
HE Jian-jian, WU Wei-lin. Distributed Power Systems and Network Research[J]. Research and Discussion, 2007, (3): 1-6.
- [6] 张国荣,张铁良,丁明,等.具有光伏并网发电功能的统一电能质量调节器仿真[J].中国电机工程学报,2007,27(14):82-86.
ZHANG Guo-rong, ZHANG Tie-liang, DING Ming, et al. A Grid-connected PV Function of Unified Power Quality Regulator Simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(14): 82-86.
- [7] 彭力,白丹,康永.三相逆变器不平衡抑制研究[J].中国电机工程学报,2004,24(5):174-178.
PENG Li, BAI Dan, KANG Yong. Reach on Three Phase Inverter on Unbalanced Load[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 174-178.

收稿日期:2008-08-20; 修回日期:2008-11-10

作者简介:

干磊(1983-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与控制、分布式发电、电能质量治理;
E-mail:ganlei9199@163.com

吴政球(1963-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统分析与控制,分布式发电;

曾议(1984-),男,硕士研究生,研究方向为分布式发电、孤岛检测。

(上接第34页 continued from page 34)
文通过对零序电压保护原理接线图的改进及对相电流的判断,较好地解决了其存在的问题。最重要的是利用了原保护装置中的电压互感器和电流互感器,弥补保护装置缺陷的同时并没有增加装置的成本。

参考文献

- [1] 陈艳霞,尹项根,郭琳云.新型并联电容器组微机保护[J].电力自动化设备,2002,22(10):33-35.
CHEN Yan-xia, YIN Xiang-gen, GUO Lin-yun. New Microprocessor Based Protection for Shunting Capacitor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002,(10):33-35.
- [2] 马晋辉.高压并联电容器组保护的分析及参数计算[J].电气应用,2007,(10):44-47,104.

- MA Jin-hui. Analysis and Calculation of High Voltage Shunt Capacitor Protection[J]. Electric Application, 2007, 22(10):44-47,104.
- [3] 高友权,高华,魏燕.配电系统继电保护[M].北京:中国电力出版社,2005.
- [4] 王维俭.电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2002.

收稿日期:2008-10-09; 修回日期:2008-11-04

作者简介:

王华伟(1982-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统电能质量分析; E-mail:Wanghuawei112@yahoo.com.cn

沈大中(1955-),男,工程师,研究方向为电力电子技术应用;

周勇(1956-),男,教授,硕士生导师,研究方向为电力系统谐波分析。