

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2018.6.07

基于虚拟阻抗的微电网离网状态改进下垂控制

于佳文, 李 新, 韩顺杰*, 张冬冬, 付香雪

(长春工业大学 电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012)

摘 要: 在有功功率-电压下垂控制($P-V$ 控制)和无功功率-频率下垂控制($Q-f$ 控制)基础上,引入虚拟阻抗环节,使得下垂控制可以应用于阻性低压微电网,并进行了相应的仿真。

关键词: 低压微电网; 离网运行; 下垂控制; 虚拟阻抗

中图分类号: TM 464 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2018)06-0556-06

Improved droop control in microgrid off-grid state

YU Jiawen, LI Xin, HAN Shunjie*,
ZHANG Dongdong, FU Xiangxue

(School of Electrical & Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: Based on active power-voltage droop control ($P-V$ control) and reactive power-frequency droop control ($Q-f$ control), a virtual impedance link is introduced make the droop control be used in resistive low-voltage microgrid. The feasibility of the method is verified with simulation.

Key words: low voltage microgrid; off-grid operation; droop control; virtual impedance.

0 引 言

在电力生产过程中,传统发电厂产生的电能主要来源于汽油、煤炭和天然气等不可再生资源。然而,随着人们对电能需求的逐步增加,不可再生资源过度开采,导致了资源枯竭和环境的污染。因此,分布式发电这种可以充分开发利用可再生能源系统随之产生。分布式发电对环境的污染较少,而且相对于传统的电力生产,其电能的质量和供电可靠性也很高。但是分布式发电也存在着许多缺点和不足,比如成本高、控制相对困难等。对

此,在 20 世纪初,国外的专家学者提出了微电网的概念^[1]。微电网是由一个或多个分布式电源、能量转换环节、负载、监控环节和系统保护环节组成的。它是一个既可以运行在并网状态下,也可以运行在离网状态下的小型电力系统^[2]。

目前,微电网逆变器的控制方法主要分为三种,分别为 PQ 控制、VF 控制和下垂控制。对于这三种控制方法,国内外专家学者们也做了大量的科学研究,并发表了大量的相关文献。文献[3-4]介绍了在离网状态下使用主从控制,对一个分布式电源采用 VF 控制,对其他分布式电源采

收稿日期: 2018-10-13

基金项目: 吉林省重点科技攻关项目(20150204023GX)

作者简介: 于佳文(1994-),男,汉族,吉林吉林人,长春工业大学硕士研究生,主要从事新能源及节能发电技术方向研究, E-mail: 569775890@qq.com. * 通讯作者: 韩顺杰(1972-),女,汉族,吉林白山人,长春工业大学教授,博士,主要从事工业节能技术与装备、分布式发电并网技术等方向研究, E-mail: hanshunjie@ccut.edu.cn.

用 PQ 控制; 文献[5]在离网状态下分析和验证了 VF 控制方法的稳定性; 文献[6]针对离网状态微电网的运行问题, 提出了电压频率分区控制方法; 文献[7]针对微电网的离网运行, 提出了逆变器的双模式下垂控制。文中针对微电网离网运行时的特点, 提出了基于虚拟阻抗的改进下垂控制策略, 并采用 Simulink 进行仿真验证。

1 传统下垂控制

微电网的下垂控制本质上是对逆变器的控

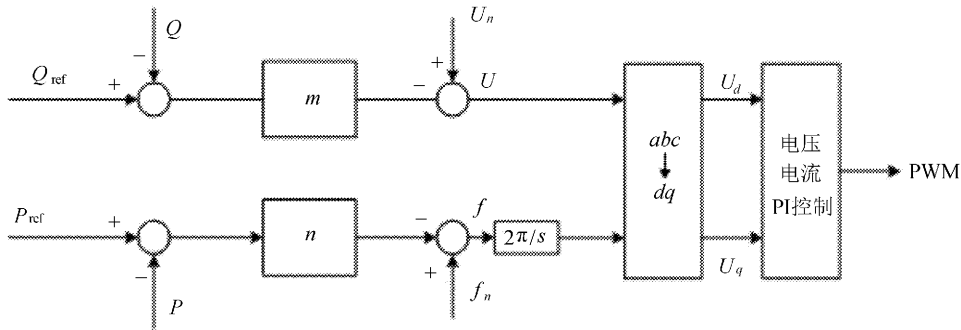


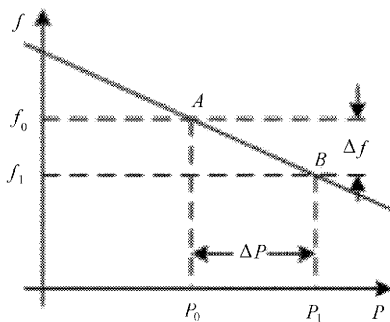
图 1 P-f、Q-V 下垂控制原理框图

以第一种下垂控制方法为例, 给定的频率 f_n 和电压参考值 U_n 来控制有功和无功的输出, 这一控制思想可以表示为:

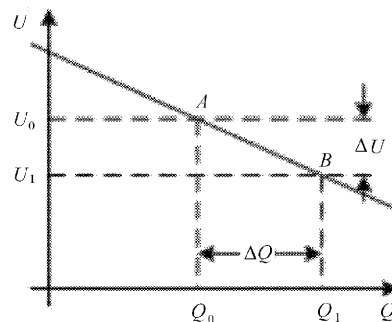
$$\begin{cases} U_n - U = m(Q_{ref} - Q) \\ f_n - f = n(P_{ref} - P) \end{cases} \quad (1)$$

制, 传统下垂控制一般有两种基本控制模式: 一种是有功-频率下垂控制 ($P-f$) 和无功-电压下垂控制 ($Q-V$); 第二种是频率-有功下垂控制 ($f-P$) 和电压-无功下垂控制 ($V-Q$)。以第一种下垂控制方法为例, 其控制方式的基本思想为频率参考值 f_{ref} 和电压参考值 U_{ref} , 分别为分布式电源输出的有功功率 P 和无功功率 Q 的函数, 换言之, 就是功率决定频率和电压。其控制原理如图 1 所示。

在频率下降过程中, 下垂控制系统令分布式电源输出的有功功率按照对应的下垂特性逐渐增大。同时由于受到频率的影响, 负荷功率也逐渐减小, 系统最终达到新的稳定状态, 电压下垂控制原理基本相同, 如图 2 所示。



(a) 频率下垂特性



(b) 电压下垂特性

图 2 下垂控制原理图

传统的下垂控制主要应用于高压配电网, 其线路主要是电感性的, 线路的阻抗非常小, 甚至可以忽略不计。但是, 对于低压微电网, 其线路主要是电阻性的, 阻抗值很大, 并不能忽略。如果仍旧使用传统的下垂控制方式对逆变器进行控制, 可能会导致系统的不稳定, 控制不准确并产生谐波分量。对此, 文中提出了对系统逆变器采用虚

拟阻抗的改进下垂控制来解决上述问题。

2 基于虚拟阻抗的改进下垂控制

针对传统的下垂控制方法不能很好地应用于低压微电网中的这一问题, 并且在控制过程中系统有功功率和无功功率之间存在强耦合。文中提出了两种方法来应对这一问题。

2.1 改进的 $P-V$ 、 $Q-f$ 下垂控制

逆变器的等效电路如图 3 所示。

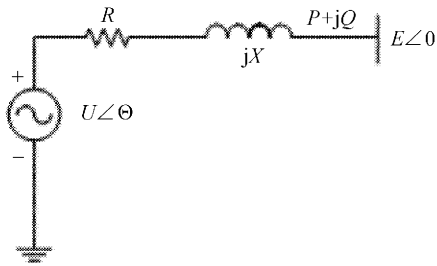


图 3 逆变器等效电路

系统总阻抗 $Z=R+jX$ ，它包括逆变器的阻抗和输电线路的阻抗。

在该系统中，有功功率和无功功率可以表示为：

$$\begin{cases} P = \frac{E}{R^2 + X^2} [R(U\cos\theta - E) + XU\sin\theta] \\ Q = \frac{E}{R^2 + X^2} [X(U\cos\theta - E) - RU\sin\theta] \end{cases} \quad (2)$$

低压微电网运行过程中，线路中的电抗值很小，所以在推导过程中，忽略线路中电抗值的大小，仅计算线路中的电阻值。即电抗值 $X \approx 0$ ，电阻值 R 不变。同时由于发电机的输出功率角一般都非常小，因此在推导过程中， $\sin\theta \approx \theta$ ， $\cos\theta \approx 1$ 。将上述值代入式(2)，并化简为：

$$\begin{cases} P = \frac{E(U - E)}{R} \\ Q = -\frac{EU}{R}\theta \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知，系统有功功率与电压幅值之间存在函数关系，无功功率与角度之间存在函数关系。由此可知，改进的 $P-V$ 、 $Q-f$ 下垂控制方程可转化为：

$$\begin{cases} U_n - U = m(P_{ref} - P) \\ f_n - f = n(Q_{ref} - Q) \end{cases} \quad (4)$$

其控制原理和仿真模型分别如图 4 和图 5 所示。

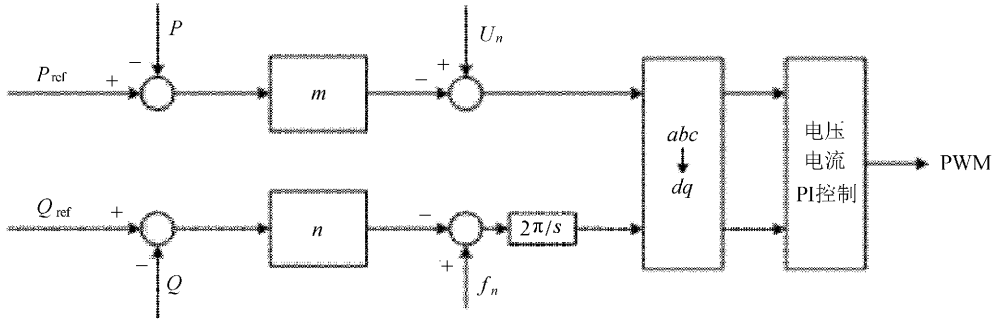


图 4 改进 $P-V$ 、 $Q-f$ 下垂控制原理图

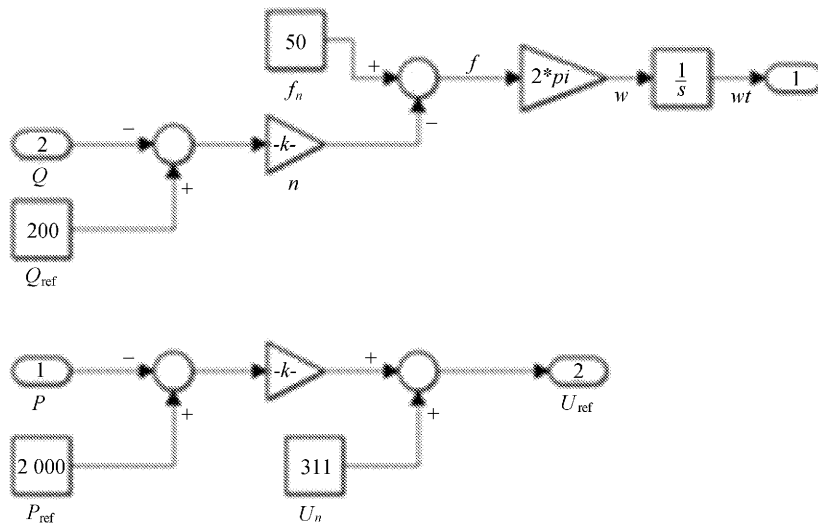


图 5 改进 $P-V$ 、 $Q-f$ 下垂控制的仿真模型

2.2 虚拟阻抗环节

为了提高系统稳定性,减少系统产生的谐波,更好地实现有功、无功之间的解耦,文中在系统的

控制过程中加入了虚拟阻抗环节。文中提出的控制方法框图如图 6 所示。

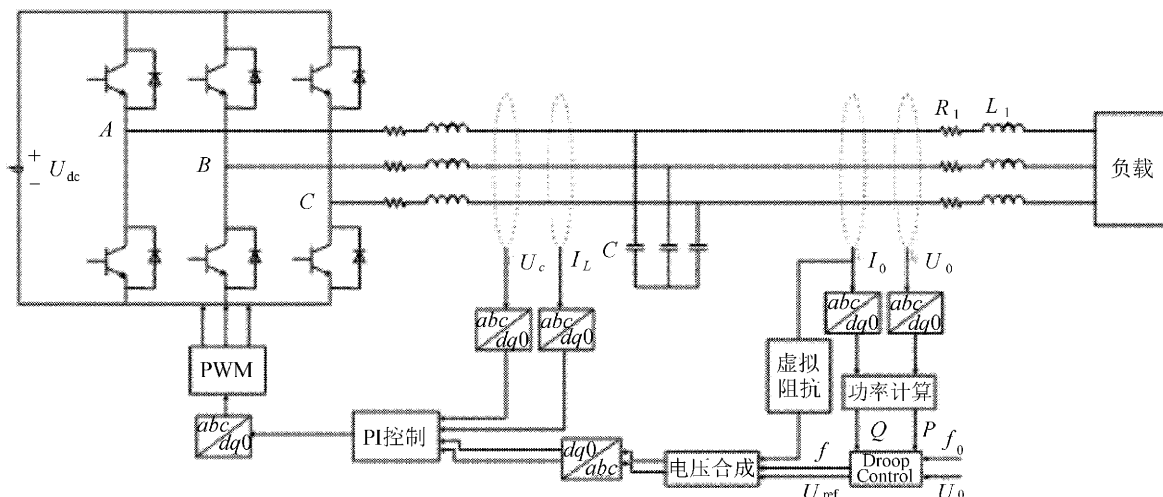


图 6 基于虚拟阻抗的下垂控制

在改进的下垂控制的基础上,从微电网系统中引出电流 I_0 ,并将该电流引入虚拟阻抗环节,使其与虚拟阻抗系数 k 相乘。同时用下垂控制环节输出的电压 U_{ref} 减去电流 I_0 和虚拟阻抗系数 k 的乘积,最终得到新的电压值进行 PI 控制,并将产生的调制信号传入 PWM 调制模块。这一过程形成了闭环控制。其中虚拟阻抗部分的数学模型可以表示为:

$$U = U_{ref} - Z_k I_0 \quad (5)$$

3 仿真结果

采用 Simulink 对提出的控制方法在微电网离网运行状态下进行了仿真分析。

本仿真系统有两个分布式电源,分别为 DG1、DG2。

三相逆变器参数如下:

交流电压有效值为 380 V;

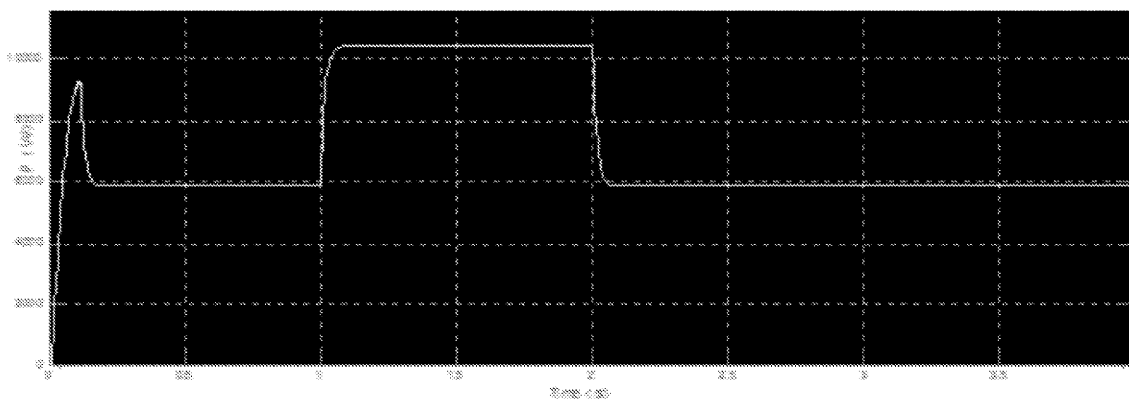
滤波电感大小为 0.264 mH;

内阻大小为 0.642 Ω ;

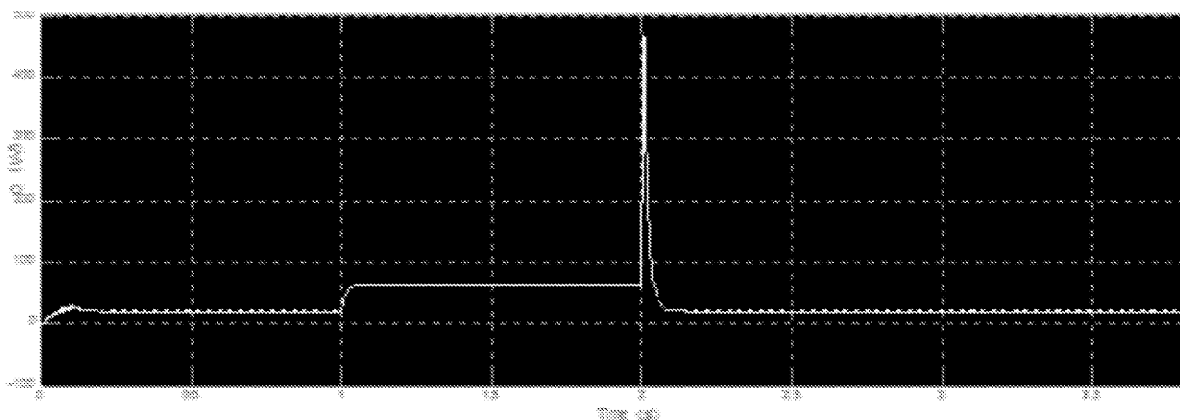
开关频率为 10 kHz。

$t=0$ 时,系统启动,DG1 和 DG2 开始运转,为系统供电; $t=1$ s 时,分布式电源 DG1 发生突变; $t=2$ s 时,分布式电源 DG2 发生突变,最终系统的有功功率和无功功率趋于稳定,实现了系统输出功率的解耦和分配。

系统功率仿真图如图 7 所示。



(a) 系统输出的有功功率波形



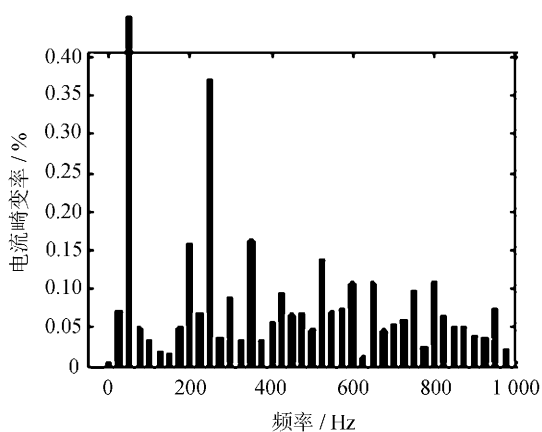
(b) 系统输出的无功功率波形

图 7 系统输出的功率波形

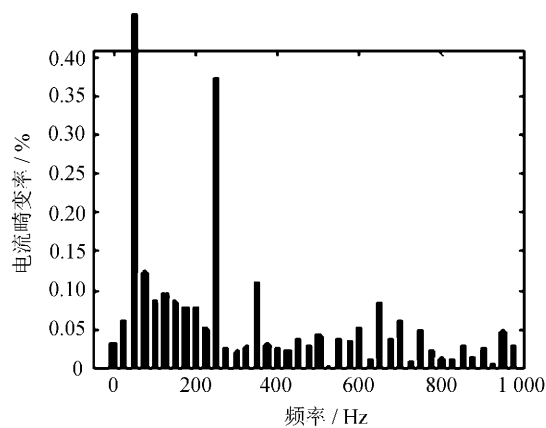
由图 7 可见,在分布式电源发生突变后,系统有功功率和无功功率的输出波形能够对应变化,并最终趋于稳定,证明了文中所提出方法的可行

性。

分别对改进前后的系统输出电流 I_{abc} 进行了 FFT 分析,其结果如图 8 所示。



(a) 改进前 FFT 分析



(b) 改进后的 FFT 分析

图 8 采用虚拟阻抗前后对输出电流的 FFT 分析

从仿真结果可以看出,控制方法改进后,系统输出电流波形谐波减少,电流趋于稳定时间减小,电流的畸变率也由 1.17% 降低为 0.63%,由此可见,虚拟阻抗对于改善运行过程中的谐波有一定的作用。

4 结 语

对传统下垂控制的控制机理及过程进行了简要分析,指出了其应用于低压微电网的缺点和不足。在此基础上,对传统的控制方法进行了改进,并加入虚拟阻抗环节。最后采用 Simulink 对提出的方法进行了模型搭建和系统仿真。通过仿真

结果可知,文中所提出的控制方法能够提高系统的稳定性,有效改善系统运行过程中的谐波问题,实现了系统输出有功功率和无功功率之间的解耦。

参考文献:

- [1] 郑漳华,艾芊.微电网的研究现状及在我国的应用前景[J].电网技术,2008,32(16):27-31.
- [2] 王成山.微电网分析与仿真理论[M].北京:科学出版社,2013.
- [3] 徐少华,李建林.光储微网系统并网/孤岛运行控制策略[J].中国电机工程学报,2013,33(34):25-33.
- [4] 付子义,王艺龙.基于主从结构微网控制策略运行分

- 析[J].电子测量技术,2016,39(10):6-10.
- [5] 李霞林,郭力,王成山,等.微网主从控制模式下的稳定性分析[J].电工技术学报,2014,29(2):24-34.
- [6] 许志荣,杨苹,郑成立,等.孤岛型风柴储微电网运行情况分析[J].电网技术,2016,40(7):1978-1984.
- [7] 陈拉拉,王蔚.PI参数自整定模糊光伏并网控制[J].长春工业大学学报,2018,39(1):63-67.
- [8] Zhang Chunjiang, Zhai Zhizhong, Meng Xiaomai, et al. Modeling and stability analysis of autonomous microgrid based on droop control[J]. Power Electronics,2012,46(10):23-26.
- [9] Gao F, Bozhko S, Costabeber A, et al. Comparative stability analysis of droop control approaches in voltage-source-converter-based DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2016,32(3):2395-2415.
- [10] Khorsandi A, Ashourloo M, Mokhtari H, et al. Automatic droop control for a low voltage DC microgrid[J]. Iet Generation Transmission & Distribution,2016,10(1):41-47.