

微电网孤岛模式下多种下垂控制策略的研究

罗锐鑫, 刘承志, 游先亮, 刘廷建
(西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘要:在以逆变器为接口的微电网系统中, 逆变电源组网控制技术是实现微电网的关键问题之一。作为自治系统的微电网, 具有脱网孤岛运行的能力, 为了满足负荷变化对系统电压和频率提出的要求, 需要针对微电网中的微电源采取相关的控制策略。分析了微电网孤岛运行时各个微电源逆变接口在不同线路阻抗特性下的功率传输特性, 给出了相应的下垂控制策略。采用坐标旋转的虚拟功率下垂控制策略, 实现了功率的解耦控制, 更接近工程实践。通过线性组合定义了类功率变量, 而提出了类功率下垂控制策略。同时设计了基于虚拟功率和类功率的功率控制器。最后给出了下垂控制策略的不足, 提出了需要深入研究的问题。

关键词: 孤岛模式; 下垂控制; 虚拟功率; 类功率; 控制器

Abstract: As the interface to the microgrid system, the control technology of grid-connected inverter is one of the key problems of the microgrid. As an autonomous system, the microgrid can be operated in islanded mode, in order to meet the requirements for system voltage and frequency during load change, some relevant control strategies for the power source in the microgrid should be studied. The power transmission features of the inverter interface of each power source under different impedance characteristics are analyzed when the microgrid is in island operation, and then the corresponding droop control strategies are given. A virtual power droop control strategy based on coordinate rotational transformation can handle the power decoupling, and it is closer to the engineering practice. The quasi-power variables are defined by the linear combination and a quasi-power droop control strategy is proposed. At the same time, a power controller based on the virtual power method and the quasi-power method is designed. At last, the disadvantages of the droop control strategy are given, and the problems which need further study are put forward.

Key words: island mode; droop control; virtual power; quasi-power; power controller

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)05-0011-04

0 引言

在能源需求日益增加, 而传统能源日趋枯竭的今天, 发展环境友好型能源如太阳能发电、风电和储能系统、先进的电池系统将在未来电网中发挥更加重要的作用。虽然这些新型能源为人类解决能源缺口提供了有效途径, 但是也因为其自身的特性为其推广应用带来了很大的阻力, 如风电的随机性、波动性、不可控性等。基于此, 学者提出了一种新的分布式能源组织方式和结构——微电网。尽管对微电网的定义不尽相同, 但国际上基本认为: 微电网是由各种分布式电源/微电源、储能单元、负荷以及监控、保护装置组成的集合; 具有灵活的运行方式和可调度性能, 即能在并网运行和孤岛运行两种模式间切换^[1]。

在微电网实际运行中需要首先解决的技术问题就是运行控制问题。从微电源的控制方法上来看, 微电源控制分为恒功率控制(PQ control), 下垂控制(droop control)和恒压恒频控制(V/f control)^[2]。当微电网处于孤岛模式时, 微电网的整体控制策略多采用对等控制, 因为在采用对等控制策略的微电网中, 下垂控制因不需要通信连接、降低系统成本、可靠性高、能实现即插即用功能(plug and play)等优点得到了广泛的关注^[3]。

由于微电网具有联网和孤岛两种运行方式, 且微电源位置具有一定的分散性, 额定功率一般不同, 因此如何选择下垂特性解决微电网中微电源的无通信连接是需要解决的问题。下面首先介绍了如何将传统电力系统中的下垂控制策略应用到微电网中, 并根据微电网自身的特点提出了新的下垂控制策略。

1 下垂控制理论和功率调节技术

1.1 基于公共节点电压在不同线路阻抗特性下的下垂控制策略理论分析^[4-6]

将传统发电机的下垂特性引入逆变电源并联的微电网中,这种方法称为电压频率下垂法,具体步骤为:①在输出阻抗近似为感性时,输出有功功率较大的逆变电源,通过频率下垂特性减小其输出频率,从而减少其有功功率输出,形成负反馈,反之亦然;输出无功功率较大的逆变电源,通过幅值下垂特性降低其电压幅值,进而减小其输出无功功率,形成负反馈,反之亦然;②在输出阻抗近似为阻性时,由于有功功率与电压幅值相关,无功功率与频率相关^[6],刚好与步骤①相反,所以有功功率的调节主要依靠幅值下垂特性,无功功率的调节主要依靠频率的下垂特性。图1所示为一个电压型控制并网模式的复频域等效电路图,该图是单相电路,同样适用于三相电路, U_s 表示公共节点电压。

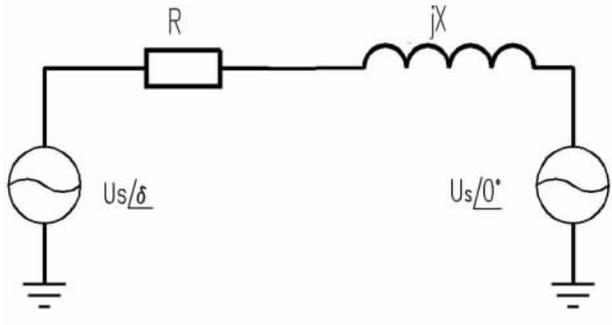


图1 微电源并网等效电路图

根据图1所示电路图,易得传输功率与线路阻抗有如下的关系。

$$\begin{cases} U_s \sin \delta = \frac{XP - R_2 Q}{E} \\ U_s \cos \delta - E = \frac{X_2 P + XQ}{E} \end{cases} \quad (1)$$

当微电网接入不同的电压等级中,输电线路呈现出不同的参数特点,一般高压输电线呈感性,中压输电线呈阻感性,而低压网络则呈现阻性^[5]。在计算潮流时,可认为 $\sin \delta \approx \delta, \cos \delta = 1$ 。

当 $X \gg R_2$ 时,和传统电力系统发电机外部运行特性一样,易得出此时微电源的控制策略就是基于经典的频率电压下垂控制策略。经典下垂控制策略为

$$\begin{cases} f - f_0 = -k_p (P - P_0) \\ U_s - U_{s0} = -k_Q (Q - Q_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中, f_0, U_{s0} 分别为额定频率和逆变器额定输出电压; P_0, Q_0 分别为逆变器额定输出有功功率和无功功率。式(2)说明能实现有功无功功率的解耦控制,具体调节原理如上述步骤①所说。

当 $X \ll R_2$,和传统电力系统发电机外部运行特性刚好相反。所以此时是通过调节电压幅值来实现有功功率的调节,通过调节频率进而调节功率角 δ 来实现无功功率的调节。控制策略公式如下所示。

$$\begin{cases} f - f_0 = k_p (Q - Q_0) \\ U_s - U_{s0} = -k_Q (P - P_0) \end{cases} \quad (3)$$

此时的下垂控制更多的称之为反调差控制,具体调节原理如上述步骤②所说。

当 X 与 R 相接近,在进行功率控制时两者都不能忽略。考虑到中压输电网络的阻抗特性,引入了正交线性旋转变换矩阵如下。

$$T = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $\theta = \arctan(X/R)$ 为输电线路阻抗角。此时修正后的虚拟有功功率和虚拟无功功率定义如下。

$$\begin{bmatrix} P' \\ Q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X}{Z} & -\frac{R}{Z} \\ \frac{R}{Z} & \frac{X}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (5)$$

仿照经典频率电压下垂控制策略的表达式,给出了修正后的适用于接入中压网络的逆变电源控制策略。

$$\begin{cases} f - f_0 = -k_p (P' - P'_0) = -k_p \frac{X}{Z} (P - P_0) + k_p \frac{R}{Z} (Q - Q_0) \\ U_s - U_{s0} = -k_Q (Q' - Q'_0) = -k_Q \frac{R}{Z} (P - P_0) - k_Q \frac{X}{Z} (Q - Q_0) \end{cases} \quad (6)$$

式中, f_0, U_{s0}, P_0, Q_0 的定义和式(2)一样。通过式(6)可以看出虚拟无功功率 Q' 和虚拟有功功率 P' 分别与电压和频率幅值呈现一一对应的关系,从而实现了解耦控制。

1.2 基于端电压和类功率的新型下垂控制策略理论分析^[7-9]

第1.1节所论述的下垂控制理论存在着许多不足,如只分析了一个逆变电源接入微电网从而忽略了多个逆变电源接入微电网产生的环流问题;所有

的下垂控制理论是采用公共节点电压,而微电网中微电源位置具有分散性,而反馈信号传输距离的限制不可能测到真正公共节点上的电压,因此上述的下垂控制理论不可能真正地实现下垂控制算法。基于以上两点的不足,提出了基于端电压和类功率的新型下垂控制策略。通过线性组合定义了类功率变量,通过合理的参数设计使得类有功功率和类无功功率分别只与相位差和幅值差有关,在整个的功率调节技术分析中只采用了逆变电源的端电压,避免了采用公共节点电压分析带来的不准确性。图2为基于三相逆变器的两台微电源并联等效电路,为简化系统仅列出单相。

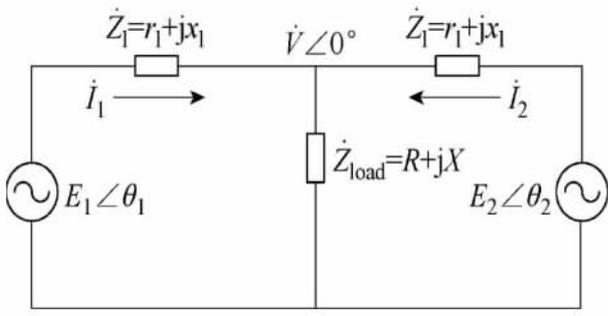


图2 微电网中两台并联逆变微电源等效电路图

由图2可以得出第1台逆变电源输出的有功功率和无功功率如式(7)(详细推导过程见文献[10]),同理,第2台逆变电源输出的有功功率和无功功率表示方法类似。

$$\begin{cases} P_1 = aE_1^2 + bE_1E_2\sin(\theta_1 - \theta_2) + cE_1E_2\cos(\theta_1 - \theta_2) \\ Q_1 = dE_1^2 - bE_1E_2\cos(\theta_1 - \theta_2) + cE_1E_2\sin(\theta_1 - \theta_2) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中的各个系数表达式如下。

$$\begin{cases} a = \frac{(R+r_1)B + (X+x_1)A}{A^2 + B^2} \\ b = \frac{-XB + RA}{A^2 + B^2} \\ c = \frac{-RB - XA}{A^2 + B^2} \\ d = \frac{(R+r_1)A - (X+x_1)B}{A^2 + B^2} \\ A = 2(r_1X + Rx_1 + r_1x_1) \\ B = 2Rr_1 - 2Xx_1 + r_1^2 - x_1^2 \end{cases} \quad (8)$$

通过线性组合定义了类有功功率 P_i 、类无功功率 Q_i ,见式(9),进而可以找到两台逆变器各自发出的类有功功率 P_{1i} 和 P_{2i} ,使得 P_{1i} 和 P_{2i} 的差值只与两台逆变器输出电压的相位差有一一对应的关系,同

样可以寻求两台逆变器各自的类无功功率 Q_{1i} 和 Q_{2i} ,使得 Q_{1i} 和 Q_{2i} 的差值只与电压的幅值差有一一对应的关系。

$$\begin{cases} P_{1i} = K_{11}P_1 + K_{12}Q_1 \\ P_{2i} = K_{11}P_2 + K_{12}Q_2 \\ Q_{1i} = K_{21}P_1 + K_{22}Q_1 \\ Q_{2i} = K_{21}P_2 + K_{22}Q_2 \end{cases} \quad (9)$$

为了达到逆变电源类有功功率的差值只与输出电压的相位差一一对应的关系和类无功功率差值只与电压的幅值差一一对应的关系,可取 $K_{11} = d, K_{12} = -a, K_{21} = -c, K_{22} = b$,从而实现两台逆变电源的均流。从上述的分析过程中可以看出,所有的功率表达式都采用了逆变电源的端电压而非公共节点电压。根据以上的分析,可以设计下垂控制方式为

$$\begin{cases} f_i = f_i^* - m(P_{ui} - P_{ui}^*) \\ E_i = E_i^* - n(Q_{ui} - Q_{ui}^*) \end{cases} \quad (10)$$

P_{ui}^* 表示额定类有功功率; Q_{ui}^* 表示额定类无功功率; f_i^* 为逆变器输出额定类有功功率对应的频率; E_i^* 为逆变器输出额定类无功功率对应的输出电压。

2 基于虚拟功率和类功率的功率控制器的设计

微电网每一个微电源的整体控制示意框图如图3所示。该控制方案既能实现基于虚拟功率的下垂控制策略,也能实现基于类功率的下垂控制策略,只需一个选择开关就能实现控制策略的切换。且该控制方案下的微电源能接入不同电压等级,具有一定的通用性。

测量微电源输出的瞬时电压和电流,通过 abc-to-dq0 变换计算得到微电源输出的瞬时有功功率和瞬时无功功率。进而通过低通滤波器得到其分别的平均功率,再由坐标旋转得到虚拟功率或者类功率,并与微电源的参考功率进行比较。最后通过不同的下垂控制器,得到微电源滤波器端口输出的参考角频率 ω 和参考电压 E ,作为双环控制器的输入。双环控制采用电感电流内环电容电压外环,使用平均功率进行调节目的是使调节过程更为平稳。

3 基于端电压和类功率的仿真

为了证明控制策略的正确性,通过 Matlab/Sim

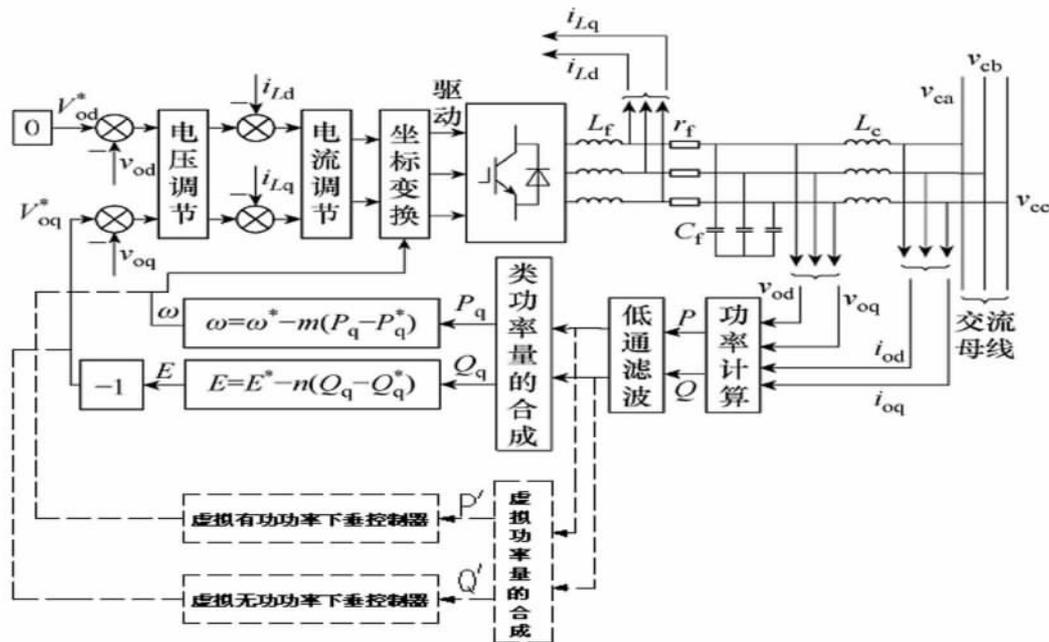


图3 微电网微电源控制示意图

ulink 搭建了基于端电压和类功率的模型,模型参数如下:设置两台逆变器的初始相位差为 1.8° , 每台逆变器输出电阻和电感分别为 0.08Ω 和 0.8 mH , $n_{eq} = 0.001$, $n_{Ep} = 1.5 \times 10^{-7}$, $n_{jq} = 1.59 \times 10^{-7}$, $m_{fp} = 3.185 \times 10^{-5}$ 。

采用1.2节所提出的新型下垂控制方法,得到的有功功率响应曲线和无功功率曲线如图4和图5所示。由图可以看出两台逆变器输出的有功功率和无功功率最终达到相等。

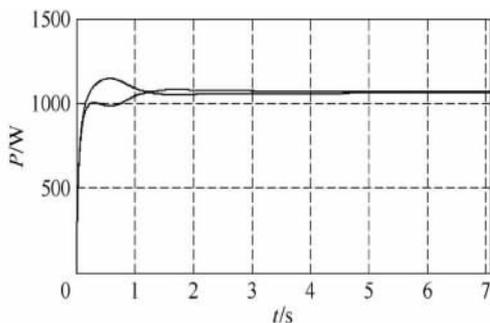


图4 有功功率曲线

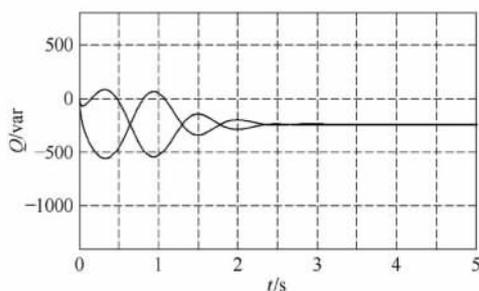


图5 无功功率曲线

4 下垂控制策略的缺点和进一步研究

当然,下垂控制策略在微电网中的应用,还存在一些需要继续深入研究的问题,主要体现在以下几个方面。

- (1) 不能正确地调节非线性负载及线路造成的谐波分布^[11]。
- (2) 对于三相系统中由于拓扑结构变化引起的控制模式变化,下垂控制不是个很好的选择,尤其是当同时有线性和非线性负载时^[12-13]。
- (3) 上述所有下垂控制策略只考虑了一次调频,而对二次调频的研究有待深入^[14]。

5 结 语

针对工程实际中存在着多种电压等级呈现出不同的阻抗特性,详细分析了微电源在阻性($X \ll R_2$)、感性($X \gg R_2$)、阻感性(X 与 R 相接近)情况下的功率传输特性,有功功率和无功功率的耦合问题,给出了相应的控制策略。提出了一种采用坐标旋转的虚拟功率控制策略,实现了在阻感性(X 与 R 相接近)情况下功率的解耦控制。同时为了更好的均流效果和并联运行,定义了类功率,设计合理的参数使得类有功功率差值只与输出电压的相位差有

(下转第20页)

平衡稳定和电流的跟踪,能够使系统获得良好的补偿效果,而且内模控制器只有一个调节参数(滤波参数),调节简单,具有很好的跟踪效果。

参考文献

[1] 罗霄华. 一阶线性时滞系统的内模控制设计[J]. 山西电子技术, 2011(6): 1-5.

[2] 齐菲. 多变量内模控制的仿真研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2008: 7-9.

[3] 宋立军. 基于电流环内模控制的IPMSM矢量控制研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2008: 35-36

[4] 郭锐, 刘国海. 静止同步补偿器数学模型及其无功电流控制研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(1): 21-24.

[5] 刘小园, 章勇高, 朱鹏程, 等. UPFC 并联侧控制器设计及仿真[J]. 华东交通大学学报, 2005, 22(1): 1-4

[6] Xiong Jian. Simplified control circuit of three phase PWM rectifier,

[7] 汤赐, 罗安. 配电网静止同步补偿器的前馈解耦控制策略[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 1-5.

[8] Pengcheng Zhu, Liming Liu, Xiaoyuan Liu, et al. Analysis and Comparison of two Control Strategies for UPFC. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, 2005, 1-3.

[9] 程汉湘. 柔性交流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 287-292.

[10] 郑连清, 王青峰. 馈能型电子负载的并网控制[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-4.

[11] 王宇. 统一潮流控制器(UPFC)的模型与仿真研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008: 17-19, 37-43.

[12] 刘永江, 康积涛, 李林, 等. UPFC 并联侧双环控制策略的研究[J]. 输配电技术, 2011(7): 1-5.

[13] 唐杰, 罗安, 周柯. 静止同步补偿器电压控制器的设计与实现[J]. 电工技术学报, 2006, 21(8): 103-106, 116.

[14] 鞠儒生, 陈宝贤, 邱晓刚. UPFC 控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 60-65.

作者简介:

张花芝(1988),女,硕士研究生,研究方向为电力系统的运行与控制。(收稿日期:2012-05-22)

(上接第14页)

关,类无功功率差值只与电压的幅值差有关,从而得出改进的下垂控制策略。针对虚拟功率和类功率的下垂控制策略,给出了一个通用的微电源控制方案示意图,详细分析了它的工作原理,最后对类功率控制策略理论做了仿真,证明了该理论的正确性。

参考文献

[1] 肖朝霞. 微网控制及运行特性分析[D]. 天津: 天津大学, 2008: 15-20

[2] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.

[3] 杨淑英, 张兴, 张崇巍. 基于下垂特性的逆变器并联技术研究[J]. 电工电能新技术, 2006, 25(2): 7-10.

[4] 徐青山. 分布式发电与微电网技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011: 127-131.

[5] 王立乔, 孙孝峰. 分布式发电系统中的光伏发电技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 110-124.

[6] 周贤正, 荣飞, 吕志鹏, 等. 低压微电网采用坐标旋转的虚拟功率V/f下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 47-51.

[7] 张纯江, 王晓寰, 薛海芬, 等. 微网中三相逆变器类功率下垂控制和并联系统小信号建模与分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 32-39.

[8] 阚志忠, 张纯江, 薛海芬, 等. 微网中三相逆变器无互连线并联新型下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(33): 68-74.

[9] 阚加荣, 谢少军, 吴云亚. 无互连线并联逆变器的功率解耦控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 40-45.

[10] 林新春, 段善旭, 康勇, 等. UPS 无互连线并联中基于解耦控制的下垂特性控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 118-122.

[11] 雷之力. 微网谐波振及电压暂降的评估与控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2011: 32-56

[12] 吕志鹏, 罗安, 荣飞, 等. 电网电压不平衡条件下微网PQ控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(6): 71-74.

[13] 刘杨华, 吴政球, 林舜江. 孤岛运行的微电网三相不平衡潮流计算方法研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36(7): 36-40.

[14] 杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 微电网孤岛运行时的频率控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 164-168.

作者简介:

罗锐鑫(1988),男,硕士研究生,从事微电网控制策略、继电保护方面的研究。

(收稿日期:2012-06-05)