

# 基于交流微网下垂控制的分层控制策略设计

为交流微网设计了一种分层控制。分层控制包含三个控制层：第一层控制基于下垂控制，包含虚拟输出阻抗环；第二层控制恢复由第一层控制产生的频率电压偏差；第三层控制调节微网与外部电网之间的功率流动。最后对分层控制微网进行仿真分析证明设计方法的有效性。

马正友/四川建筑职业技术学院信息工程系



马正友/副教授

分布式发电相对大规模集中式发电，有诸多优势，具有污染少、可靠性高、能源利用效率高且安装地点灵活等多方面优点。微网是分布式电源接入配电网一种新的形式，而且是今后发展的趋势。与发电机直接并网相比，通过电力电子接口的分布式电源输出的电压和频率由接口逆变器控制策略决定。而控制策略的选择要满足微网三种运行状态下的要求：孤岛运行时，微网必须维持自身电压和频率；并网运行时，微网必须满足主电网的接口要求，控制功率流动；两种运行方式切换的暂态时，微网需要解决孤岛并网时如何与主电网同步，并网切换到孤岛时，电能和负荷需求不平衡等问题。本文基于 $P-f$ 和 $Q-V$ 下垂控制策略，研究了下垂控制改进方法，设计了多层分级控制用以解决微网控制中的三个要求。最后通过仿真结果证明方法的有效性。

## 电网结构

DG构成的微网与配电网连接示意图如图1所示，微网中控制系统（Micro-Grid Central Control System, MGCCS）通过信号线（虚线）控制各断路器（QF、QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>）。由图1可知，微网

由DG、逆变器、储能设备、断路器、负荷、母线和线路构成，根据负荷的重要程度接在不同的母线上。DG具有随机性，一般要求配备储能装置向负荷提供高质量电能，因此DG需要通过逆变器才能与常规配电网连接。本文主要研究逆变器的控制策略，为了简化分析，假定逆变器直流侧电压已通过相应的控制策略保持恒定，分析中用理想直流电压源等效。

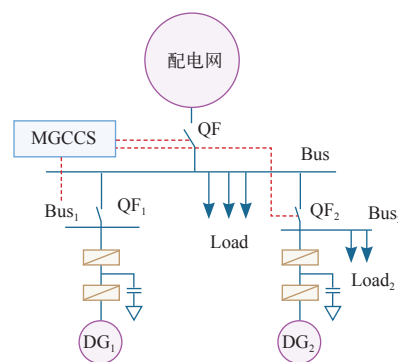


图1 电网连接示意图

配电网容量相对于分布式电源容量可视为无穷大，当并网运行后，微网电压和频率都随着配电网电压和频率的变化而变化。为了提高分布式能源的利用率，希望分布式电源能够不受配电网电压和频率波动的影响而采用PQ控制方式保持输出功率恒定。本文通过动态调节下垂系数实现分布式电源输出功率恒定。

## 下垂控制原理

所谓下垂控制，是指逆变器的控制方式与发电机频率一次调整相似，通过解耦有功功率-频率和无功功率-

### 关键词/Keywords

下垂控制 ·  
分层控制 ·  
微网 (MG) ·  
并列运行 ·

电压幅值之间的下垂特性曲线进行电压和频率的调节,使其达到新的稳定。在逆变电源并联系统中,各电源测量自身输出功率,通过下垂控制得到输出电压频率和幅值的参考值,然后通过电压电流双闭环控制微调其输出电压幅值和频率,达到系统有功和无功功率的合理分配。各逆变电源的输出电压频率和幅值均按下式变化

$$f = f^* - m(P - P^*) \quad (1)$$

$$E = E^* - n(Q - Q^*) \quad (2)$$

式中,  $f$  和  $E$  分别为下垂特性计算后的频率和电压;  $P$  和  $Q$  为输出有功功率和无功功率,相应带下标的变量为下垂控制参考值;  $m$  和  $n$  分别为有功功率和无功功率的下垂系数。

## 基于下垂控制的多层分级控制策略

本文多层分级控制设计如下:第一层控制是利用下垂控制方法模拟大电网特性,加入虚拟阻抗控制环模拟物理输出阻抗;第二层控制是保证微网运行在允许范围内,同时包含同步内环控制用以无缝连接或断开微网和系统;第三层控制是控制微网与大电网之间的功率流动。

但是传统大电网的下垂特性是基于假设同步发电机输出阻抗和线路阻抗主要为感性,忽略阻性影响。而低压微网的线路阻抗接近纯阻性,阻性不能忽略。

### 1. 第一层控制

此层控制调整内环电流电压控制中的频率和电压参考值。主要方法是在逆变器控制模拟同步发电机的下垂特性,如下所示

$$m = \frac{\Delta f}{P_{\max}} \quad (3)$$

$$n = \frac{\Delta V}{2Q_{\max}} \quad (4)$$

式中,  $\Delta f$  和  $\Delta V$  为允许范围内最大频率和电压;  $P_{\max}$  和  $Q_{\max}$  为逆变器输送的最大有功、无功功率。若逆变器可以吸收有功功率,  $m = \Delta f / 2P_{\max}$ 。

当分布式发电单元含有储能系统时,有功功率输出量受储能系统中蓄电池充电量的影响。因此改进频率下垂特性如下

$$f = f^* - \frac{m}{a}(P - P^*) \quad (5)$$

式中,  $a$  为蓄电池的充电状态(蓄电池充满状态时  $a = 1$ , 蓄电池放空时  $a = 0.01$ )。

传统大电网的下垂特性是基于假设同步发电机输出阻抗和线路阻抗主要为感性。但是微网使用电力电子元件,输出阻抗决定于内环控制的控制策略。而且低压微网的线路阻抗接近纯阻性。因此式(1)和式(2)应根据派克变换中的  $\theta$  角进行改进

$$f = f^* - G_P(s)[(P - P^*)\sin\theta - (Q - Q^*)\cos\theta] \quad (6)$$

$$E = E^* - G_Q(s)[(P - P^*)\cos\theta - (Q - Q^*)\sin\theta] \quad (7)$$

第一层控制还包括虚拟阻抗环,输出电压表示为

$$v_0^* = v_{\text{ref}} - Z_D(s)i_0 \quad (8)$$

式中,  $v_{\text{ref}}$  为参考值;  $Z_D(s)$  为传递函数,等价于同步发电机的一系列阻抗。加入虚拟阻抗环后,逆变器输出阻抗变为可控变量。因此,可根据输出阻抗和线路阻抗角  $\theta = \tan^{-1}X/R$  的相角。图2为虚拟阻抗环和其他控制环:电压环和电流环的联系。

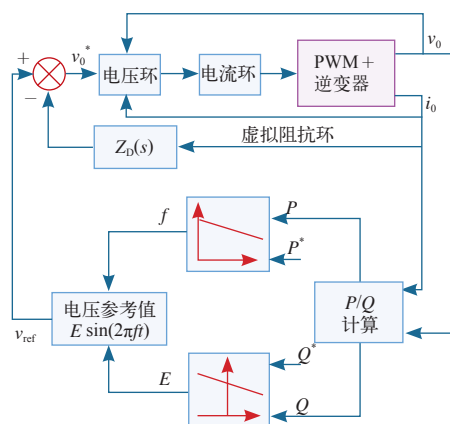


图2 虚拟阻抗环和其他控制环

### 2. 第二层控制

第二层控制保证微网内出现负荷和发电出现变化时使频率电压偏移量趋于零。微网测量频率  $f_{\text{MG}}$  和电压  $V_{\text{MG}}$  后,与  $f_{\text{MG}}^*$  和  $V_{\text{MG}}^*$  比较的差值 ( $\delta f$  和  $\delta V$ ) 送到每个逆变器并恢复输出电压幅值和频率。 $\delta f$  和  $\delta V$  的计算如下

$$\delta f = k_{pf}(f_{MG}^* - f_{MG}) + k_{if} \int (f_{MG}^* - f_{MG}) dt + \Delta f_s \quad (9)$$

$$\delta V = k_{pv}(V_{MG}^* - V_{MG}) + k_{iv} \int (V_{MG}^* - V_{MG}) dt \quad (10)$$

式中,  $k_{pf}$ 、 $k_{if}$ 、 $k_{pv}$ 和 $k_{iv}$ 为第二层控制参数;  $\Delta\omega_s$ 为同步参数, 微网孤岛运行时值为0。

如图3所示, 第一层控制测量输出电压和电流计算有功功率和无功功率后传送到下垂控制和虚拟阻抗环。第二层控制作为第一层控制的补偿, 利用式(9)和式(10)恢复由第一层控制产生的电压频率偏差。

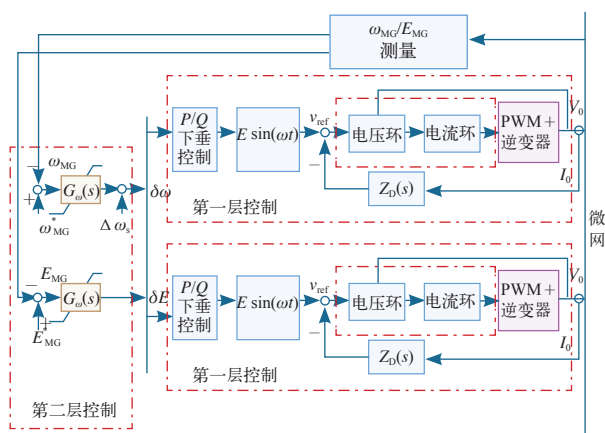


图3 交流微网第一层和第二层控制

微网并网时, 控制系统测量大电网的频率电压作为第二层控制的参考值。如图4所示, 微网与大电网之间的相角差由图4中的同步控制环进行同步。同步控制环的作用相当于传统PLL。PLL的输出信号 $\Delta\omega_s$ 传送到第二层控制用以同步微网各模块的相角。同步完成后断路器合闸, 微网实现并网运行。

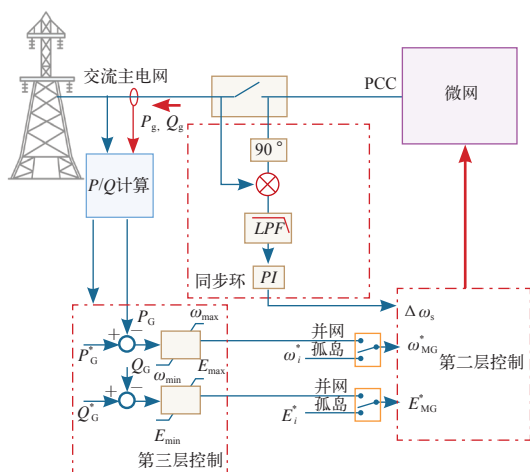


图4 交流微网第三层控制及同步环

### 3. 第三层控制

微网处于并网状态时, 功率流动的控制可以通过调整微网内部频率和电压幅值实现。如图4所示, 测量断路器处的有功和无功功率 $P_G$ 和 $Q_G$ 后, 与期望值 $P_G^*$ 和 $Q_G^*$ 比较。如下式所示

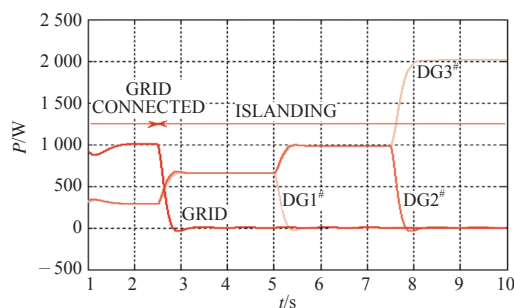
$$f_{MG}^* = k_{pP}(P_G^* - P_G) + k_{iP} \int (P_G^* - P_G) dt \quad (11)$$

$$V_{MG}^* = k_{pQ}(Q_G^* - Q_G) + k_{iQ} \int (Q_G^* - Q_G) dt \quad (12)$$

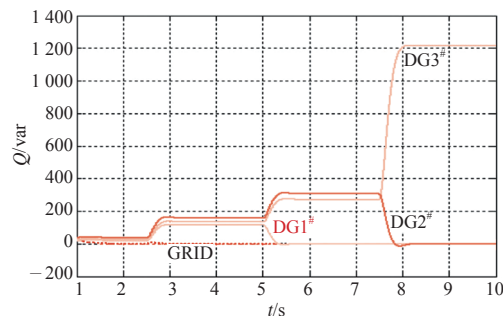
式中,  $k_{pP}$ 、 $k_{iP}$ 、 $k_{pQ}$ 和 $k_{iQ}$ 为第三层控制参数; 孤岛状态下 $f_{MG}^*$ 和 $V_{MG}^*$ 由第二层控制产生, 微网并网时,  $f_{MG}^*$ 和 $V_{MG}^*$ 等于大电网的测量值。

### 微网控制仿真分析

为验证本文设计的控制方法能否满足并网运行、孤岛运行及切换状态的运行要求, 本文在欧盟提出的典型低压微网系统上进行仿真分析。图5为微网内的有功无功功率动态变化。三逆变器系统处于并网运行状态。2.5 s时, 第三层控制将微网参考值从0调整到1 kW, 每个逆变器输出650 W。2.5 s时, 微网孤岛运行。5 s时, 逆变器DG1<sup>#</sup>退出运行, 逆变器DG2<sup>#</sup>和DG3<sup>#</sup>向负荷供电。7.5 s时, DG2<sup>#</sup>退出运行, DG3<sup>#</sup>提供全部功率。从图5中可看出微网在并网状态和孤岛状态的灵活切换。



(a) 有功功率



(b) 无功功率

图5 仿真分析图

孤岛运行时, 第一层控制产生的频率和电压幅值偏差可以由第二层控制环补偿。如图6所示, 频率和电压的瞬态响应比较, 黑线为带有第二层控制的微网, 灰线没有。

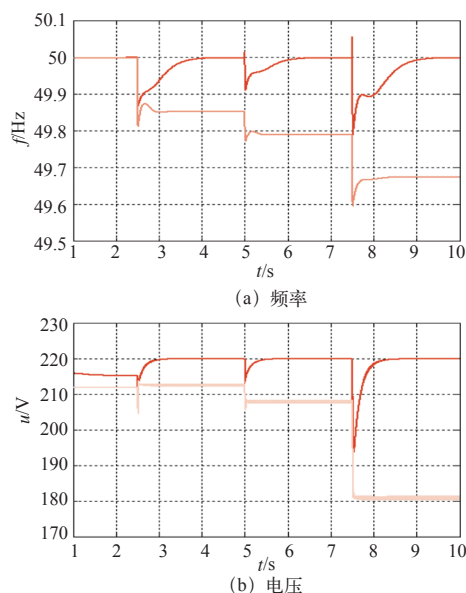


图6 仿真分析图

## 结束语

本文对传统的 $P-f$ 和 $Q-V$ 下垂控制进行了改进, 在交流微网中采用三层控制, 兼顾微网的多种运行状态下的控制要求, 孤岛运行时可维持电压频率稳定, 并网运行时调节微网与大电网之间的功率流动, 运行状态切换时, 可消除断路器两端电压偏差, 最终实现微网的同步并网。最后搭建微网控制系统实现上述控制方式, 仿真结果验证了所提出的微网控制策略的有效性。

## 参考文献

[1] 王赞, 肖岚, 姚志垒, 等. 并网独立双模式控制

高性能逆变器设计与实现 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (1): 55-59.

[2] 纪明伟, 张兴, 杨淑英. 基于电压源逆变器的微电网控制策略 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2009, 32 (11): 1678-1682.

[3] 肖朝霞, 王成山, 王守相. 微网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略 [J]. 电工技术学报, 2009, 24 (2): 100-107.

[4] Guerrero J M, Vasquez J C, Matas J, et al. Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56 (3): 726-736.

[5] 牟晓春, 毕大强, 任先文. 低压微网综合控制策略设计 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (19): 91-96.

[6] Engler A. Applicability of droops in low voltage grids [J]. International Journal of Distributed Energy Resources, 2005, 1 (1): 1-6.

[7] 王成山, 高菲, 李鹏, 等. 低压微网控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (25): 2-9.

[8] 姚玮, 陈敏, 牟善科, 等. 基于改进下垂法的微电网逆变器并联控制技术 [J]. 电力系统自动化, 2009, 3 (6): 77-80, 94.

[9] Hurng-Liahng Jou, Jinn-Chang Wu, Kuen-Der Wu. Analysis of zig-zag transformer applying in the three-phase four-wire distribution power system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (2): 1168-1173.

(收稿日期: 2014-09-13) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告