

含多微源的混合微电网控制策略与仿真

针对微电网内部分布式电源和负荷的多样性、分散性，在分析 P/Q 控制以及基于下垂特性的 V/f 控制策略的基础上，采用了一种 $P/Q-V/f$ 对等控制策略。该策略可有效实现负荷功率共享，保证微电网频率和电压的稳定。在PSCAD/EMTDC仿真平台上，对所建微电网模型进行运行模式转换以及孤岛下切/增负荷的仿真分析，证明所提出的控制策略具有有效性和正确性。

程海军 鲁宝春 姜丕杰/辽宁工业大学电气工程学院



程海军/讲师

近年来，基于新能源的分布式发电技术得到了快速的发展。伴随着分布式电源（Distributed Generation, DG）越来越多地接入大电网系统，不可避免地会对电网的电能质量造成影响^[1-2]。为了减小影响且充分利用DG为主电网带来的价值和利益，微电网的概念被提出并得到了广泛的关注。微电网相对于大电网系统是一个模块化的可控单元，它可以与大电网并联运行，也可以单独孤岛运行为其内部的负荷供电，而这些功能的实现主要依赖于微电网的控制策略。

微电网的控制技术又依赖于以电力电子为接口的DG逆变器的控制策略。逆变器控制策略分为 P/Q 控制、 V/f 控制以及下垂控制等^[3-5]。文献[6]在研究下垂控制理论的基础上，得到了一种改进的 P/V 下垂控制策略；文献[7]在分析低压配电线路的基础上，提出了下垂与倒下垂控制器，但其调节时间过长，会造成系统的不稳定；文献[8]提出了下垂控制策略，并研究了逆变器控制参数和网络参数对

不平衡负荷功率分配的影响；文献[9]通过采用坐标旋转的虚拟功率控制策略，实现了低压微电网的有功、无功解耦控制。

针对含多微源的微电网系统，本文提出 $P/Q-V/f$ 对等控制策略，在PSCAD/EMTDC平台中搭建了含多种DG的微电网系统，通过仿真分析各微源的功率输出、电压以及频率的变化，证明了微电网在运行模式转换及负荷变化等情况下均可保持稳定运行，同时验证了所提控制策略的有效性、可行性。

混合微电网模型

本文的微电网模型系统包括燃气轮机单元（ DG_1 ）、异步风力发电单元（ DG_2 ）、蓄电池储能单元（ DG_3 ）以及光伏发电单元（ DG_4 ），具体如图1所示。其中，针对出力随机性较大的光伏发电单元和风力发电单元常采用最大功率跟踪控制实现功率恒定输出，因此此种微电源采用恒功率（ P/Q ）控制。而对于燃气轮机、蓄电池储能等单元，在并网运行时采用 P/Q 控制，保证其功率按给定值输出；孤岛运行时采用恒压频（ V/f ）控制，使此类微电源按电压和频

关键词/Keywords

微电网·
分布式电源·
 P/Q 控制·
 V/f 控制·
运行仿真·

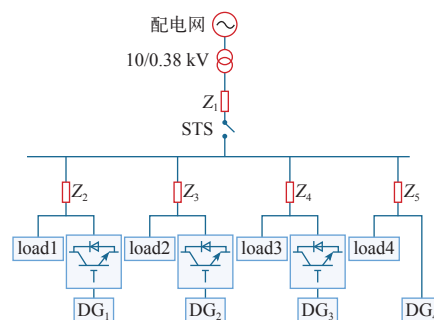


图1 混合微电网模型

辽宁省教育厅基金项目：微电网建模及控制方法的研究（L2013246）。

率的参考值运行,从而保证微电网电压和频率的稳定性。

逆变器控制模型

1. P/Q控制

P/Q 控制的主要目的是使DG的输出有功和无功功率可以等于参考功率或维持在其附近。适合并网运行,主网为其提供运行时的电压和频率。 dq 坐标系下,令 q 轴电压分量为零,逆变器输出功率和输出电压的数学模型为

$$S = P + jQ = U_g I^* = (u_{gd} + ju_{gq})(i_d - ji_q) \quad (1)$$

$$= u_{gd}i_d - ju_{gd}i_q$$

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{gd} \\ 0 \end{pmatrix} - \omega L \begin{pmatrix} i_q \\ -i_d \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, $\Delta u_d = (k_p + \frac{k_i}{s})(i_d^* - i_d)$; $\Delta u_q = (k_p + \frac{k_i}{s})(i_q^* - i_q)$ 。

由式(1)可以得到 dq 轴的电流参考值为

$$\begin{cases} i_{dref} = P_{ref}/u_{gd} \\ i_{qref} = -Q_{ref}/u_{gq} \end{cases} \quad (3)$$

式中, i_d 、 i_q 和 u_d 、 u_q 为逆变器并网侧输出电流和电压的 dq 轴分量; u_{gd} 、 u_{gq} 为电网电压的 dq 轴分量; ω 为工频角频率; k_p 、 k_i 为PI控制器的比例积分系数; P_{ref} 、 Q_{ref} 为有功和无功功率的参考值。由此可得到 P/Q 控制结构如图2所示。

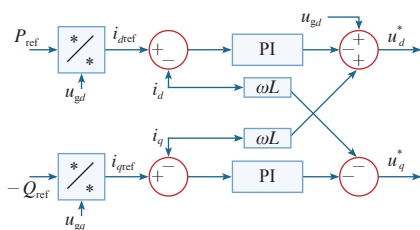


图2 P/Q控制结构

2. V/f及锁相环控制

文中的 V/f 控制是基于下垂特性的控制。下垂控制策略以逆变器输出电压的幅值与频率为控制变量来调整逆变器的输出功率,使其保持在正常范围内(即 f/P 和 V/Q 控制)。输出功率参考值的下垂控制方程为

$$\begin{cases} P_{ref} = P(t) + k_1[f^* - f(t)] \\ Q_{ref} = Q(t) + k_2[V^* - V(t)] \end{cases} \quad (4)$$

式中, $P(t)$ 、 $Q(t)$ 分别为逆变器输出的有功和无功功率; k_1 、 k_2 分别为频率、电压下垂系数; f^* 、 V^* 分别为输出电压和频率的参考值。

基于下垂特性的 V/f 控制框图如图3所示。外环包括下垂控制环节和功率控制环节,对电网电压进行 dq 变换,并作为锁相环的输入得到电压、频率和相位的参考值,即 V^* 、 f^* 和 θ^* , V^* 、 f^* 分别与逆变器额定输出电压的幅值 V_0 、频率 f_0 作差,通过下垂特性引入逆变器额定输出功率 P_0 、 Q_0 ,从而得到逆变器输出有功和无功功率的参考值。逆变器网侧实际输出功率与参考值的差值经PI环节得到内环控制电流的参考值 i_{dref} 、 i_{qref} ,内环电流控制与 P/Q 控制方式相同。

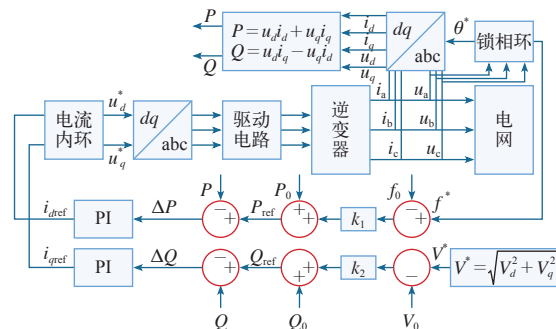


图3 基于下垂特性的 V/f 控制结构

图3中的锁相环可使逆变器的输出电压与电网电压保持同步,锁相环的控制原理如图4所示。图中, φ 为电网相位角; v_d 、 v_q 为电网电压在 dq 坐标系下的分量。PI控制器的输出可以得到逆变器的输出频率,进而可以得到逆变器的相位角 θ 。电网的额定角频率 ω_0 可作为前馈项引入到PI控制器的输出中,以加强动态响应。

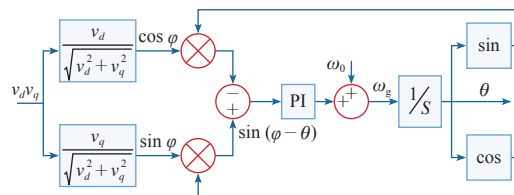


图4 锁相环控制原理

PIQ-V/f对等控制的仿真

由以上分析,提出了 $P/Q-V/f$ 对等控制策略,

在PSCAD/EMTDC平台中搭建图1所示的混合微电网结构。对微电网模型在并网与孤岛两者之间进行切换以及孤岛运行时负荷改变等情况下的运行进行仿真分析,观察各微电源的功率输出情况以及微电网母线电压和频率,从而验证所提控制策略的可行性和正确性。

光伏发电单元通常采用最大功率跟踪控制,其逆变器的控制方式在并网和孤岛运行状态时都采用 P/Q 控制,保证其输出功率恒定。燃气轮机发电单元以及蓄电池储能单元均采用文中提出的 $P/Q-V/f$ 控制策略。各微电源输出功率参考值、微电网系统各项参数如表1、表2所示。

表1 各微电源的输出功率参考值

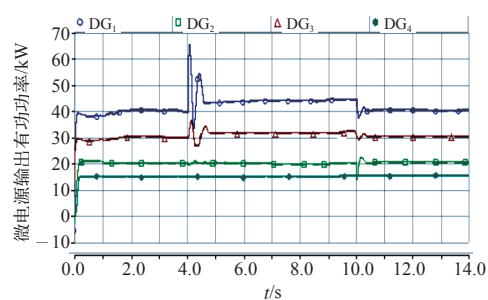
名称	P_{ref}/kW	$Q_{\text{ref}}/\text{kvar}$
燃气轮机发电单元	40	25
蓄电池储能单元	30	15
光伏发电单元	15	0
异步风力发电单元	20	5

表2 微电网参数

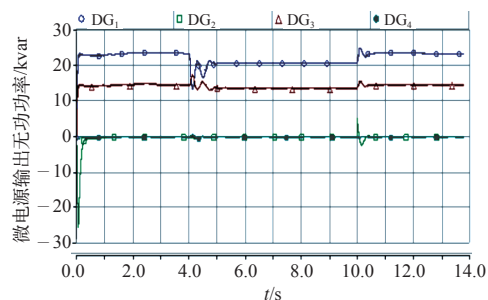
名称	参数
交流母线额定电压/kV	0.38
电网频率/Hz	50
线路参数 (R/X) / (Ω/km)	0.642/0.083
LC滤波	L : 0.5 mH, C : 200 μF
频率下垂系数	1×10^{-3}
电压下垂系数	0.1×10^{-3}
Load1	38 kW + 18 kvar
Load2	30 kW + 13 kvar
Load3	10 kW
Load4	20 kW + 5 kvar

1. 微电网运行模式转换时的仿真

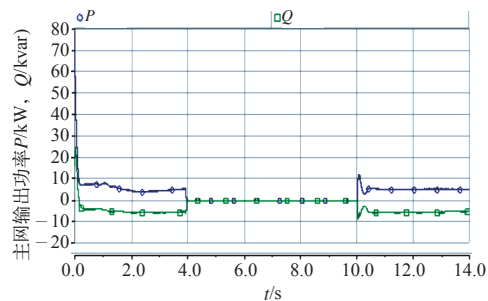
微电网运行模式转换时的仿真如图5所示。微电网在 $t=4\text{ s}$ 处进入孤岛运行,在 $t=10\text{ s}$ 处恢复并网状态,仿真时间15 s。在模式切换过程中,采用 $P/Q-V/f$ 对等控制策略的燃气轮机单元和蓄电池储能单元共同调节有功输出,弥补大电网缺额。系统母线电压波动较小,频率波动在 $50 \pm 0.3\text{ Hz}$ 范围内。所提控制策略可较好地维持系统电压和频率,实现平滑切换。



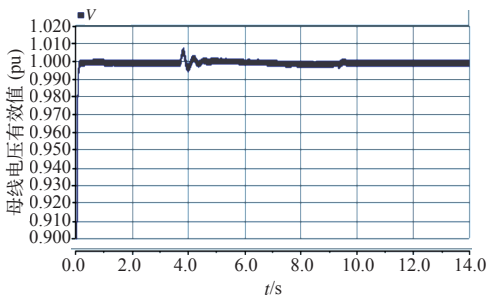
(a) 微电源输出有功功率



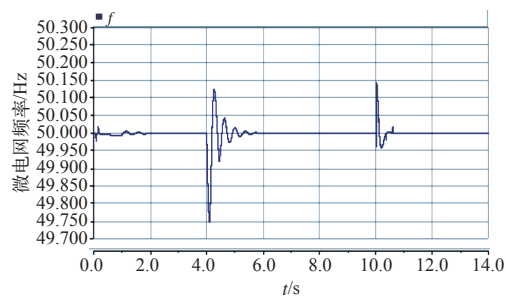
(b) 微电源输出无功功率



(c) 主网输出有功和无功功率



(d) 母线电压



(e) 系统频率

图5 微电网运行模式切换的仿真

2. 孤岛模式下负荷变化的仿真

微电网孤岛模式下负荷变化的仿真如图6所示。微电网在 $t=4$ s处进入孤岛运行；在 $t=10$ s处微电网内部负荷减少10 kW；在 $t=16$ s处负荷恢复，仿真时间20 s。在此过程中，频率的波动范围在 (50 ± 0.1) Hz内，母线电压也有波动，但基本保持稳定。

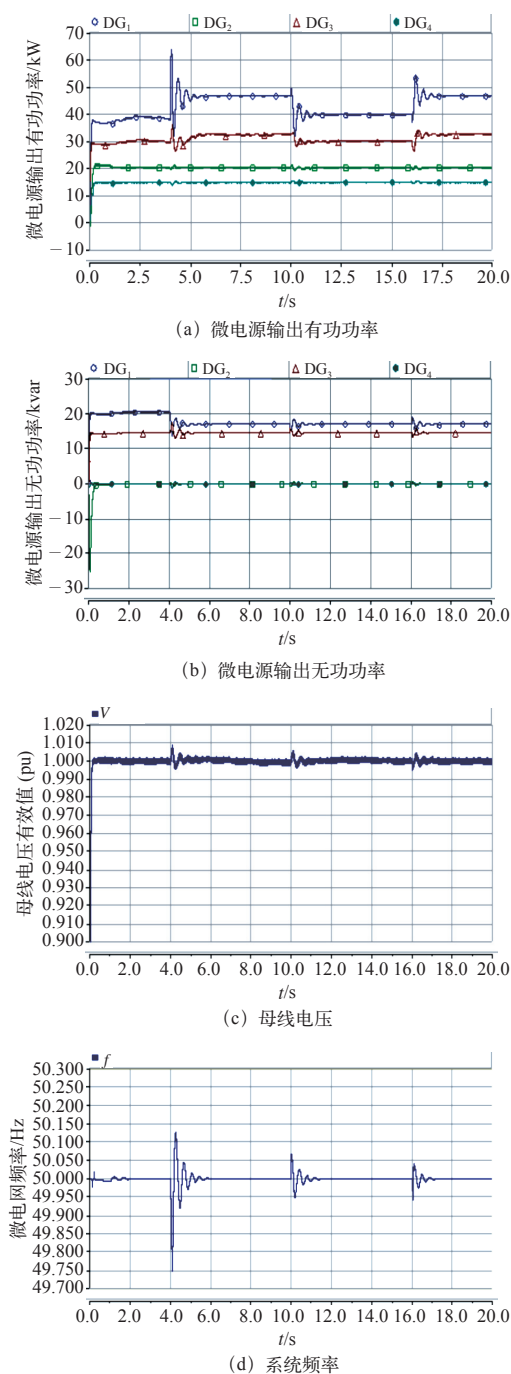


图6 微电网孤岛运行下负荷变化的仿真

结束语

针对含多微源的微电网系统，提出了 $P/Q-V/f$ 对等控制策略。通过分析微电网在运行模式切换和负荷变化过程中的微网功率、电压和频率的动态响应，证明了微电网模型可实现运行模式之间的平滑切换，并具有一定的抗扰动能力，验证了所提控制策略的可行性和有效性。但实际微电网可能要面对频繁切换的复杂工况，如何保证控制策略在任何工况下完成无缝切换并抵抗冲击，将是今后重要的研究方向。

参考文献

- [1] 李鹏, 张玲, 王伟, 等. 微电网技术应用与分析 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (20): 109-115.
- [2] 黄伟, 孙昶辉, 吴子平, 等. 含分布式发电系统的微电网技术研究综述 [J]. 电网技术, 2009, 33 (9): 14-18.
- [3] 郑竞宏, 王燕廷, 李兴旺, 等. 微电网平滑切换控制方法及策略 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (18): 17-24.
- [4] 毕大强, 牟晓春, 任先文, 等. 含多微源的微电网控制策略设计 [J]. 高电压技术, 2011, 37 (3): 687-693.
- [5] 郜登科, 姜建国, 张宇华. 使用电压-相角下的微电网控制策略设计 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (2): 47-52.
- [6] 孙孝峰, 吕庆秋. 低压微电网逆变器频率电压协调控制 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (8): 77-84.
- [7] 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, 2009, 32 (11): 1678-1682.
- [8] 杨俊虎, 韩肖清, 等. 基于逆变器下垂控制的微电网动态性能分析 [J]. 南方电网技术, 2012, 6 (4): 48-52.
- [9] 周贤正, 荣飞, 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): 47-52.

(收稿日期: 2015-03-26) EA