

# 逆变型微电源孤岛模式下的控制策略

胡 雯, 孙云莲

(武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 针对微电网孤岛运行模式下的传统下垂控制依赖于下垂系数、网络的动态特性的不足, 对其进行改进。采用自适应前馈补偿对微电源和微电网其他部分进行动态解耦, 以提高动态系统的稳定性和鲁棒性。采用小信号模型进行稳定性分析, 增加了递推最小二乘估计算法来估计系统运行点, 使控制系统具有自适应特性。该控制策略适用于多逆变型微电源并联运行和功率均分。利用 MATLAB/Simulink 建立微电网仿真模型, 仿真结果表明所提出的控制方法在微电源为可再生能源发电和微电网内部动态特性变化时, 可以较快响应并能防止系统发生振荡。

**关键词:** 微电网; 孤岛运行; 自适应前馈补偿; 下垂控制; 小信号模型; 递推最小二乘估计

**中图分类号:** TM 862

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.07.018

## 0 引言

微电网技术是智能电网关键技术之一, 是分布式电源多点分散接入配电网的重要技术手段。微电网技术实现了中低压层面上分布式电源的灵活、高效应用, 能够将原来分散的电源进行整合, 提高配电网对可再生能源发电的接纳能力<sup>[1-2]</sup>。利用当地的可再生能源建成独立微电网不仅可以降低供电成本、满足微电网内部负荷需求, 同时解决了分布式电源单机接入成本高、控制困难的问题。

微电网是一个集成了相互连接的负荷、分布式电源和储能的能源系统, 通过公共连接点与电网相连, 可以并网运行或孤岛运行<sup>[3]</sup>。自治的孤岛是微电网的一个重要特征, 可提高对故障、电压骤降等突发事件的应对能力和对市场的响应能力<sup>[4]</sup>。

微电网中往往存在多个微电源, 孤岛模式下的控制是要保障有功/无功的电力分配和电压/频率的协调控制。美国电力可靠性技术解决方案协会(CERTS)提出的下垂控制采用就地信息进行发电和负荷的协调控制, 实现负荷分配和频率/电压调节<sup>[5]</sup>。传统的高压系统的下垂特性常会直接应用到微网中<sup>[6]</sup>, 传统的下垂控制本质上是防止相互竞争的稳态措施, 其暂态、稳态特性依赖于下垂系数、网络的动态特性、微电源和负荷。因此, 孤岛模式下传统下垂控制的暂态特性并不理想, 稳态的控制效果也有局限性。实际上由于网络拓扑和部分微电源的波动性, 有必要将网络/负载动态特性纳入控制设计中<sup>[7]</sup>。文献<sup>[8]</sup>提出了采用前馈加 PID 电压内环控制方法实现更好的电压跟踪控制效果。文献<sup>[9]</sup>在有功下垂控制环节中增设前馈环节来改善微电网小扰动稳定性, 但难以保证微电网频率的稳定<sup>[10]</sup>。文献<sup>[10]</sup>提出将电压和相角偏差作为前馈量加入功率控制环节以提高

系统动态性能。

本文考虑了下垂控制的稳定性问题, 提出在下垂控制的基础上采用前馈补偿来改善微电源与微电网的动态耦合, 提高系统的稳定性。采用递推最小二乘估计算法来计算系统稳态运行点, 使前馈补偿具有自适应性。最后在微电网系统上对所提出的控制策略进行了仿真验证, 结果证明了控制策略的合理性和有效性。

## 1 孤岛运行的控制策略

### 1.1 控制策略

在微电网中, 系统突加、突卸负荷等扰动对系统稳定性的影响比互联电力系统大; 微电网系统需要有效的控制策略快速平息所造成的电压、电流和频率变化。孤岛运行时微电源控制策略需要满足<sup>[11-12]</sup>:

- a. 对负荷配置和动态特性的稳定、快速响应;
- b. 有针对输出短路和外部故障的保护;
- c. 适应不平衡和谐波失真的输出电流;
- d. 采用相同的功率电路和控制组件;
- e. 支持黑启动;
- f. 允许基于下垂特性的多个微电源功率均分。

图 1 所示微电源及其控制系统包括: 电流控制型微电源、三相 LC 滤波器和断路器 QF。断路器 QF 由同步方案控制, 即微电源电压稳定且与配电网同步时才能并网。微电源交流侧电压  $u_{abc}$  和电流  $i_{abc}$ 、微电源端电压  $u_{sabc}$ 、变压器低压侧电压  $u'_{sabc}$  以及微电源输出电流  $i_{oabc}$  是通过保持采样电路和数模转换器提取的离散化变量, 并通过  $dq$  变换得到。孤岛运行时 QF 打开,  $u_{abc}$  和  $u'_{sabc}$  相等, 需要控制微电源为负荷提供稳定的电压和频率。

### 1.2 控制模型

#### 1.2.1 电流控制分析与设计

在动态时间域,  $i_{abc}$  可以描述为空间矢量方程:

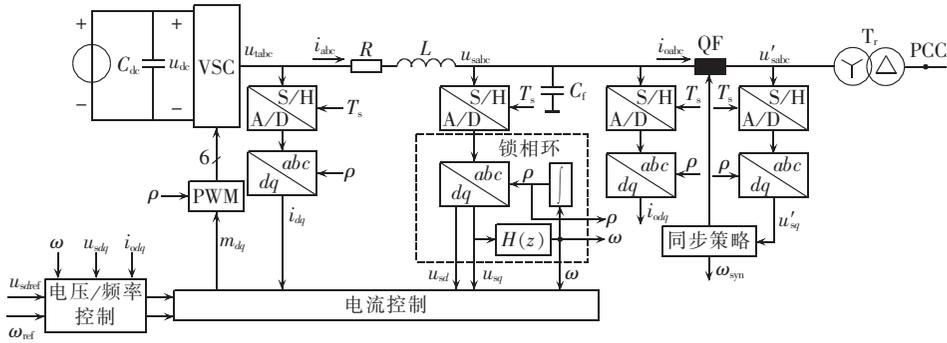


图 1 微电源及其控制系统

Fig.1 Micro-source and its control system

$$L \frac{d\mathbf{i}}{dt} = -R\mathbf{i} + \mathbf{u}_t - \mathbf{u}_s \quad (1)$$

$$K_i(z) = \frac{z(z-a)}{b(z^2-1)} \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{i}, \mathbf{u}_t, \mathbf{u}_s$  分别是  $i_{abc}, u_{tabc}, u_{sabc}$  的空间向量表示。

PWM 信号控制微电源的交流侧电压  $u_{tabc}$ ,  $\mathbf{u}_t = (u_{dc}/2)\mathbf{m}$ 。用  $d, q$  轴分量描述的展开式为:

$$L \frac{di_d}{dt} = -Ri_d + \underbrace{\left( L\omega i_q + m_d \frac{u_{dc}}{2} - u_{sd} \right)}_{\zeta_d} \quad (2)$$

$$L \frac{di_q}{dt} = -Ri_q + \underbrace{\left( L\omega i_d + m_q \frac{u_{dc}}{2} - u_{sq} \right)}_{\zeta_q} \quad (3)$$

虚拟控制输入量  $\zeta_d, \zeta_q$  用来消除  $i_d$  和  $i_q$  之间的耦合, 可以将上式离散化为:

$$i_d(k+1) = ai_q(k) + b\zeta_d(k) \quad (4)$$

$$i_q(k+1) = ai_d(k) + b\zeta_q(k) \quad (5)$$

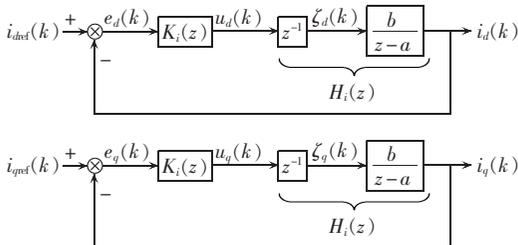
其中,  $a = e^{-RT_s/L}, b = -\frac{1}{R}(e^{-RT_s/L} - 1)$ 。

把锁相环 (PLL) 输出变量  $\omega(t) = d\rho/dt$  代入式 (2) 和 (3), 得到:

$$\zeta_d(k) = L\omega(k)i_q(k) + m_d(k) \frac{u_{dc}}{2} - u_{sd}(k) \quad (6)$$

$$\zeta_q(k) = -L\omega(k)i_d(k) + m_q(k) \frac{u_{dc}}{2} - u_{sq}(k) \quad (7)$$

采用  $k-1$  和  $k$  次采样信号预测  $k+1$  次信号时假设满足线性关系:  $x(k+1) = 2x(k) - x(k-1)$ 。对  $d, q$  轴分量动态解耦, 电流控制为 2 个独立的控制回路; 采用  $u_{sd}(k), u_{sq}(k)$  对  $i_d(k), i_q(k)$  的影响进行补偿, 如图 2 所示, 图中  $H_i(z) = b/[z(z-a)]$ 。为了得到快速响应, 闭环回路的极点放在  $z$  平面的原点。

图 2 解耦后的  $d, q$  轴电流控制回路Fig.2 Decoupled  $d$ - and  $q$ -axis current control loops

### 1.2.2 电压幅值控制分析与设计

$u_{sabc}$  可描述为 PCC 处负荷电压的空间向量方程:

$$C_f \frac{d\mathbf{u}_s}{dt} = \mathbf{i} - \mathbf{i}_o \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{i}_o$  是输出电流  $i_{oabc}$  的空间向量表示。可得:

$$u_{sd}(k+1) = u_{sd}(k) + \frac{T_s}{C_f} \delta_d(k) \quad (10)$$

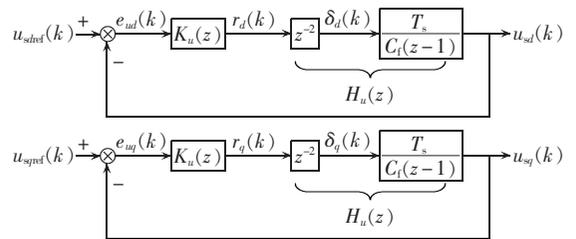
$$u_{sq}(k+1) = u_{sq}(k) + \frac{T_s}{C_f} \delta_q(k) \quad (11)$$

其中,  $\delta_d(k) = i_d(k) - i_{od}(k) + C_f \omega(k) u_{sq}(k)$ ;  $\delta_q(k) = i_q(k) - i_{oq}(k) - C_f \omega(k) u_{sd}(k)$ 。

式 (11)、(12) 的传递函数形式为:

$$\frac{U_{sd}(z)}{\delta_d(z)} = \frac{U_{sq}(z)}{\delta_q(z)} = \frac{T_s}{C_f} \frac{1}{z-1} \quad (12)$$

采用  $k-1$  和  $k$  次采样信号预测  $k+2$  次信号时假设满足线性关系:  $x(k+2) = 3x(k) - 2x(k-1)$ 。对电压控制同样进行解耦, 得到控制框图如图 3 所示, 图中  $H_u(z) = T_s/[C_f z^2(z-1)]$ 。采用 PI 补偿器  $K_u(z)$  对  $u_{sd}(k), u_{sq}(k)$  与期望值之间的误差信号进行补偿。

图 3 解耦后的  $d, q$  轴电压控制回路Fig.3 Decoupled  $d$ - and  $q$ -axis voltage control loops

### 1.2.3 频率控制分析与设计

频率控制是根据  $\omega_{ref}$  对  $u_{sabc}$  的频率进行控制。孤岛运行时, 通过控制  $u_{sref}(k)$  来调节  $\omega(k)$ , 如图 4 所示。锁相环对频率控制是基于:

$$\Omega(z) = H(z)U_{sq}(z) \quad (13)$$

其中,  $H(z) = k_p/(z-1)$ ,  $k_p$  是滤波器的增益。

图 4 中,  $H(z)$  的原点在  $z=1$ ,  $u_{sq}(k), u_{sref}(k)$  在稳

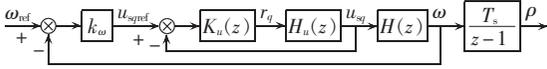


图 4 频率控制回路

Fig.4 Frequency control loop

定状态时为 0,因此采用补偿增益  $k_\omega$  确保  $\omega_{ref}(k)$  稳态误差为 0。

1.2.4 自适应前馈补偿

基于下垂特性的微电源控制框图如图 5 所示。

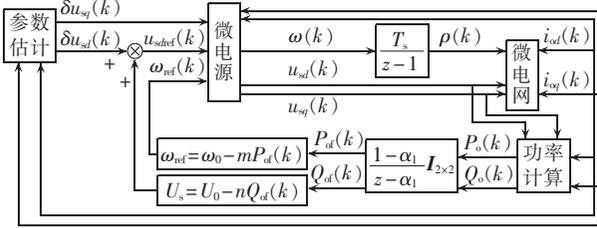


图 5 基于下垂特性的微电源控制框图

Fig.5 Block diagram of micro-source control based on droop characteristic

微电源输出有功、无功的功率计算符合:

$$P_{of}(k+1) = \alpha_1 P_{of}(k) + 1.5(1-\alpha_1) \times [u_{sd}(k)i_{od}(k) + u_{sq}(k)i_{oq}(k)] \quad (14)$$

$$Q_{of}(k+1) = \alpha_1 Q_{of}(k) + 1.5(1-\alpha_1) \times [-u_{sd}(k)i_{oq}(k) + u_{sq}(k)i_{od}(k)] \quad (15)$$

微电源端电压的幅值、频率受下垂控制:

$$\omega_{ref}(k) = \omega_0 - mP_{of}(k) \quad (16)$$

$$u_{sdr}(k) = U_0 - nQ_{of}(k) + \delta u_{sd}(k) \quad (17)$$

其中,  $m, n$  分别是有功、无功的下垂系数;  $\delta u_{sd}, \delta u_{sq}$  是零稳态值的辅助信号;  $\omega_0, U_0$  分别是微电源空载时端电压的频率和幅值。

为了提高系统的稳定性,需要降低微电源和微电网其他部分的动态耦合程度,但仍需保持稳态和准稳态的有功/无功功率均分。采用小信号模型分析式(14)、(15)中系统的稳态和动态特性<sup>[13-15]</sup>。

$$\tilde{P}_{of}(k) = \beta_1 \tilde{P}_{of}(k-1) + \beta_2 \tilde{i}_{od}(k-1) + \beta_3 \tilde{u}_{sd}(k-1) + \beta_4 \tilde{u}_{sq}(k-1) \quad (18)$$

$$\tilde{Q}_{of}(k) = \beta_1 \tilde{Q}_{of}(k-1) - \beta_2 \tilde{i}_{oq}(k-1) + \beta_4 \tilde{u}_{sd}(k-1) + \beta_3 \tilde{u}_{sq}(k-1) \quad (19)$$

其中,  $\beta_1 = \alpha_1; \beta_2 = 1.5(1-\alpha_1)U_{sd0}; \beta_3 = 1.5(1-\alpha_1)I_{od0}; \beta_4 = 1.5(1-\alpha_1)I_{oq0}$ ; “~”和下标“0”分别表示对应变量的小信号扰动分量和稳态分量。

幅值控制需要确保  $u_{sd}(k), u_{sq}(k)$  快速调节至设定值,因此:

$$\tilde{u}_{sd}(k) \approx -n\tilde{Q}_{of}(k) + \delta u_{sd}(k) \quad (20)$$

$$\tilde{u}_{sq}(k) \approx \delta u_{sq}(k) \quad (21)$$

可以建立:

$$\beta_3 \delta u_{sd}(k) + \beta_4 \delta u_{sq}(k) = \beta_2 \tilde{i}_{oq}(k) + n\beta_3 \tilde{Q}_{of}(k) \quad (22)$$

$$-\beta_4 \delta u_{sd}(k) + \beta_3 \delta u_{sq}(k) = -\beta_2 \tilde{i}_{od}(k) - n\beta_4 \tilde{Q}_{of}(k) \quad (23)$$

式(20)、(21)代入式(18)、(19),结合式(22)、(23)可以近似得到:

$$\tilde{P}_{of}(k+1) = \beta_1 \tilde{P}_{of}(k) + \beta_2 \tilde{i}_{od}(k) + \beta_2 \tilde{i}_{oq}(k) \quad (24)$$

$$\tilde{Q}_{of}(k+1) = \beta_1 \tilde{Q}_{of}(k) - \beta_2 \tilde{i}_{od}(k) - \beta_2 \tilde{i}_{oq}(k) \quad (25)$$

式(24)、(25)控制微电源输出有功、无功的小信号动态特性,其稳定性通过李雅普诺夫直接法验证。

下面的半正定函数作为李雅普诺夫函数:

$$V(k) = [\tilde{Q}_{of}(k) + \tilde{P}_{of}(k)]^2 \quad (26)$$

所以,有:

$$\Delta V(k) = (\beta_1^2 - 1) [\tilde{Q}_{of}(k) + \tilde{P}_{of}(k)]^2 \quad (27)$$

因为  $0 < \beta_1 < 1 (\beta_1 = \alpha_1 = e^{-T_s \omega_0} < 1)$ , 所以  $\Delta V(k) \leq -\varepsilon_0 V(k) (\varepsilon_0 = 1 - \beta_1^2 > 1)$ , 即系统是渐近稳定的,且系统的稳定性不受下垂系数或网络属性影响。

把式(24)、(25)写成矩阵表示形式,  $\delta u_{sd}, \delta u_{sq}$  可以通过下式计算:

$$\begin{bmatrix} \delta u_{sd}(k) \\ \delta u_{sq}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 \\ g_2 & -g_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{oq}(k) \\ \tilde{i}_{od}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n\tilde{Q}_{of}(k) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

其中,  $g_1 = \frac{\beta_2 \beta_3}{\beta_3^2 + \beta_4^2}; g_2 = \frac{\beta_2 \beta_4}{\beta_3^2 + \beta_4^2}$ 。

前馈补偿中要确定  $\delta u_{sd}, \delta u_{sq}$  就需要知道微电源终端电压和输出电流的稳态值。实际运行时,微电网系统的运行点会随着负荷而变化;因此采用递推最小二乘估计算法估计系统运行点,参数的估计在每个采样点更新。

定义估计参数向量和数据向量:

$$\theta^T = [\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4] \quad (29)$$

$$\phi(k) = [P_{of}(k), \tilde{i}_{od}(k), \tilde{u}_{sd}(k), \tilde{u}_{sq}(k)]^T \quad (30)$$

考虑式(20)、(21)控制系统响应导致的额外误差,式(24)可以写成:

$$\tilde{P}_{of}(k) = \phi^T(k-1)\theta + e(k) \quad (31)$$

在第  $k$  个采样周期计算参数估计  $\tilde{\theta}^T$  的步骤如下。

a. 根据第  $k$  个周期的采样数据和第  $k-1$  个周期的估计参数计算预测误差  $\varepsilon(k)$ :

$$\varepsilon(k) = \tilde{P}_{of}(k) - \phi^T(k)\tilde{\theta}(k-1) \quad (32)$$

b. 计算估计参数的向量  $\hat{\theta}^T = [\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3, \hat{\beta}_4]$ :

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{r\phi(k)}{\gamma + \phi^T(k)\phi(k)}\varepsilon(k) \quad (33)$$

其中,  $\gamma$  是为了避免  $\phi(k)=0$  而引入的正常数;因子  $r$  改变参数调整步长,  $0 < r < 2$ 。

c. 为下一个周期计算,更新误差协方差  $P(k)$ :

$$P(k) = \left[ \sum_{i=1}^k \phi^T(i)\phi(i) \right]^{-1} \quad (34)$$

$g_1, g_2, \delta u_{sd}, \delta u_{sq}$  可以根据式 (28) 求得, 相关变量的小信号扰动通过高通滤波器获取。

### 1.3 多微电源的控制

孤岛运行时的控制策略必须适用于多微电源系统。将上述控制方法用于多电源的微电网控制, 微电网中每个微电源的  $\omega_{ref}, u_{sdref}$  分别按照各自输出有功、无功下垂控制。微电源输出能量  $S = \frac{3}{2} u_s^* i_s^*$ , 是通过系统终端电压和输出电流计算。由于输出电流存在不平衡或畸变的可能, 输出有功、无功通过滤波后再用来计算设定值  $\omega_{ref}, u_{sdref}$ :

$$\omega_{ref} = \omega_0 - m P_{of}(k) + \omega_{syn}(k) \quad (35)$$

$$u_{sdref}(k) = U_0 - n Q_{of}(k) \quad (36)$$

其中,  $\omega_0, U_0$  分别是电网频率、电压的额定值;  $P_{of}(k), Q_{of}(k)$  分别是滤波后的输出有功、无功;  $m, n$  是下垂系数;  $\omega_{syn}$  是用于同步的可控参量。

计算滤波后的输出有功、无功:

$$P_{of}(k) = \alpha P_{of}(k-1) + (1-\alpha) \text{Re}\{S\} \quad (37)$$

$$Q_{of}(k) = \alpha Q_{of}(k-1) + (1-\alpha) \text{Im}\{S\} \quad (38)$$

其中,  $\alpha$  是低通滤波器的极点;  $\text{Re}\{S\}, \text{Im}\{S\}$  分别是  $S$  的实部、虚部。

式 (35) — (38) 用于计算频率、幅值的设定值, 以保障系统的即插即用, 扩展多电源系统 [16]。

## 2 仿真验证

为了验证上述控制策略, 在 MATLAB/Simulink 搭建了微电网仿真系统, 采用西门子 20 kV 标准中压配电网模型, 修改电压等级及部分线路模型, 改成 10 kV 高压微电网, 配电侧容量远大于微电网容量。如图 6 所示, 模型包含 2 个微电源 (DER<sub>1</sub> 和 DER<sub>2</sub>) 和 1

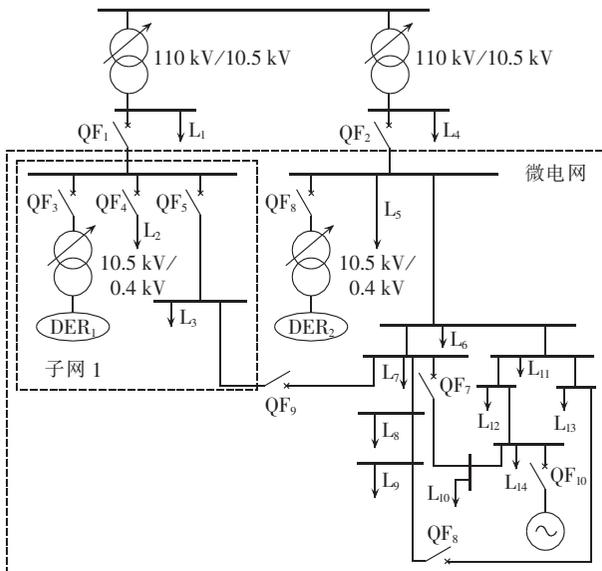


图 6 微电网结构图

Fig.6 Structure of microgrid

个异步电机, 本文讨论微电网孤岛运行时的控制策略, 开关 QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub> 处于断开状态。

### 2.1 算例 1 (微电源采用可再生能源的分布式电源)

在本例中, QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub> 断开, 其他开关闭合。微电源 DER<sub>1</sub>、DER<sub>2</sub> 分别采用风力发电机和光伏电源的模型, QF<sub>10</sub> 处接入储能单元。对于风力发电机, 模拟风速波动变化; 对于光伏电源, 0.75 s 时日照强度由最初的 1.0 kW/m<sup>2</sup> 降到 0.8 kW/m<sup>2</sup>, 1.25 s 时逐步回升。

直驱永磁同步发电机是并网风力发电的一种常用形式, 其模型包括风能模型、涡轮模型、发电机模型、逆变模型和 MPPT 最大风能捕捉模型。

$$\begin{cases} P_m = 0.5 \rho A v^3 C_p \frac{R\omega}{v} \\ \frac{1}{2} J \omega^2 = \int (P_m - P_c) dt \\ u_{sd} = -R_s i_{sd} - L_d \frac{di_{sd}}{dt} + \omega_s L_q i_{sq} \\ u_{sq} = -R_s i_{sq} - L_q \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s L_d i_{sd} + \omega_s \psi_f \\ T_e = \frac{3}{2} p i_q [i_d (L_d - L_q) + \psi_f] \\ P_e = u_{sq} i_{sq} + u_{sd} i_{sd} \end{cases} \quad (39)$$

其中,  $P_m$  为风轮机的机械输出功率;  $P_e$  为发电机输出的有功功率;  $\rho$  为空气密度;  $A$  为叶片扫过的面积;  $v$  为风速;  $C_p$  为风轮功率系数;  $R$  为叶片的半径;  $\omega$  为风轮轴的角速度;  $J$  为风力发电机的平均惯量 (包括风力涡轮机、传动系统和发电机转子的惯量);  $u_{sd}$  和  $u_{sq}$  为端电压;  $i_{sd}$  和  $i_{sq}$  为定子电流;  $R_s$  为定子绕组的电阻;  $p$  为极对数; 非凸极机的定子电感  $L_d$  和  $L_q$  大致相等。

光伏电源是基于半导体的光生伏特效应, 将太阳光辐射直接转换为电能; 受日照和温度的影响, 对模型进行简化。

$$\begin{cases} \Delta T = T - T_{ref} \\ \Delta S = S / S_{ref} - 1 \\ I'_{sc} = I_{sc} \frac{S}{S_{ref}} (1 + a \Delta T) \\ U'_{oc} = U_{oc} (1 - c \Delta T) \ln(1 + b \Delta S) \\ I'_m = I_m \frac{S}{S_{ref}} (1 + a \Delta T) \\ U'_m = U_m (1 - c \Delta T) \ln(1 + b \Delta S) \end{cases} \quad (40)$$

其中,  $I_{sc}$  为短路电流;  $U_{oc}$  为开路电压;  $I_m$  为最大功率点电流;  $U_m$  为最大功率点电压;  $S_{ref}$  为参考光照强度 1000 W/m<sup>2</sup>;  $T_{ref}$  为参考电池温度 25 °C;  $\Delta T$  为实际电池温度与参考值的差;  $\Delta S$  为实际光照强度与参考值的差;  $a = 0.0025 / ^\circ\text{C}$ ;  $b = 0.5 / ^\circ\text{C}$ ;  $c = 0.00288 / ^\circ\text{C}$ 。

图 7 是光伏电源、风机电源、储能单元的有功输出功率, 变化过程符合风速、光照强度变化规律。孤岛运行时无功功率主要由储能单元输出, 如图 7(d)

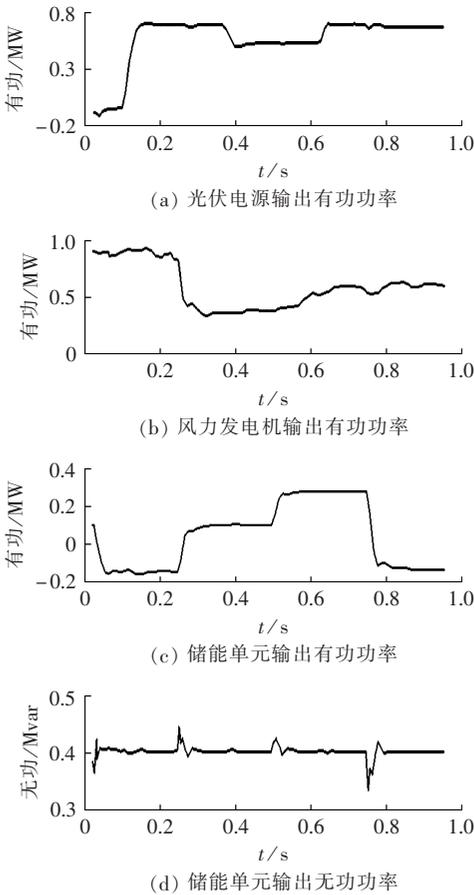


图 7 新能源微电源的响应

Fig.7 Response of renewable micro-sources

所示,在系统存在干扰时有所偏移。

2.2 算例 2(孤岛运行时系统突加、突卸负荷)

在本例中,模拟孤岛运行时微电源对于负荷变化的响应;此时断开 QF<sub>1</sub>、QF<sub>9</sub>,闭合 QF<sub>3</sub>,通过调节 QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub> 在子网 1 内模拟系统突加、突卸负荷。假设 0~0.05 s 时,DER<sub>1</sub> 运行在稳定状态,QF<sub>4</sub>、QF<sub>5</sub> 断开,即 DER<sub>1</sub> 空载运行。当 t=0.05 s 时,QF<sub>4</sub> 闭合,即接入 RL 负荷 L<sub>2</sub>(328 kW,功率因数 0.85)。如图 8 所示,接入负荷后负荷电流增加;由于负荷是感性的,i<sub>ld</sub> 为负值。当 t=0.1 s 时,QF<sub>5</sub> 闭合,即接入 RLC 负荷 L<sub>3</sub>(390 kW,功率因数为 1),此时系统满负荷运行,i<sub>ld</sub> 的稳态值接近为 0。d 轴分量 u<sub>sd</sub> 和 i<sub>ld</sub> 有较大波动,是因为负荷 L<sub>3</sub> 中的电容。当 t=0.15 s 时,断开 QF<sub>5</sub>,此时系统运行在 0.05~0.1 s 相似的工况下。当 t=0.2 s 时,断开 QF<sub>4</sub>,此时系统空载运行。

图 8 所示是负荷变化时子网 1 内 DER<sub>1</sub> 的输出量(图中电压量为标么值),控制系统可以较快地平息负荷变化所引起的电压、电流和频率的变化。电压的最大波动发生在 RLC 负荷接入时,在不到半个周期内恢复稳定。

2.3 算例 3(孤岛运行时网络拓扑结构变化)

在本例中,模拟孤岛运行时微电源对系统拓扑结

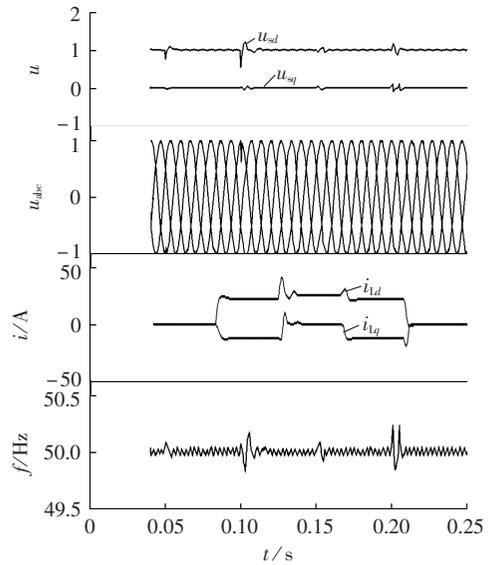


图 8 负荷变化时微电源的响应

Fig.8 Response of micro-source to load change

构变化及动态特性变化的响应,系统参数为:DER<sub>1</sub>,容量 1 MW、0.8 Mvar,R<sub>1</sub>=1.5 mΩ,L<sub>1</sub>=1 mH,C<sub>n1</sub>=0.15 mF,m<sub>1</sub>=2.0,n<sub>1</sub>=0.02;DER<sub>2</sub>,容量 0.4 MW、0.26 Mvar,R<sub>2</sub>=3 mΩ,L<sub>2</sub>=0.5 mH,C<sub>n2</sub>=0.3 mF,m<sub>2</sub>=4.0,n<sub>2</sub>=0.04;f<sub>s</sub>=50 Hz;k<sub>p</sub>=10;k<sub>ω</sub>=0.005。

系统初始状态:QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub> 断开,QF<sub>3</sub>—QF<sub>8</sub> 闭合,DER<sub>1</sub> 和 DER<sub>2</sub> 分别运行在稳定的孤岛内。当 t=0.5 s 时闭合 QF<sub>9</sub>(开关闭合前 2 个微电源进行同步控制),微电源的负荷是由 2 个微电源根据功率分配的原则进行供电。当 t=1.5 s 时闭合 QF<sub>10</sub>,微电网中接入异步电机(250 kW)并进行同步并网。

当孤岛运行的微电网系统中扰动时,微电源在传统下垂控制方法和本文所述的控制方法下输出功率如图 9、10 所示。随着网络拓扑结构发生改变和负荷变化,常规控制方法下的微电源输出波形出现了明显的波动,接入异步电机后系统发生振荡。而本

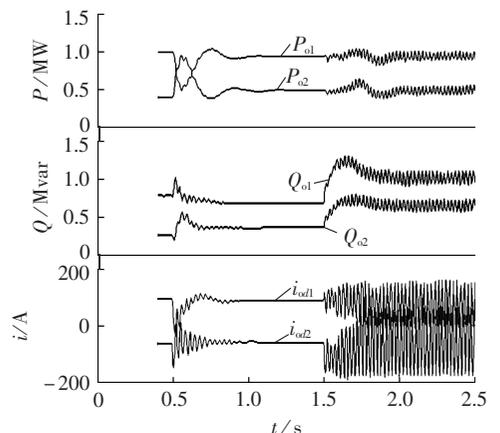


图 9 微电源孤岛运行时的响应(传统下垂控制方法)

Fig.9 Response of micro-source operating in island mode(traditional droop control)

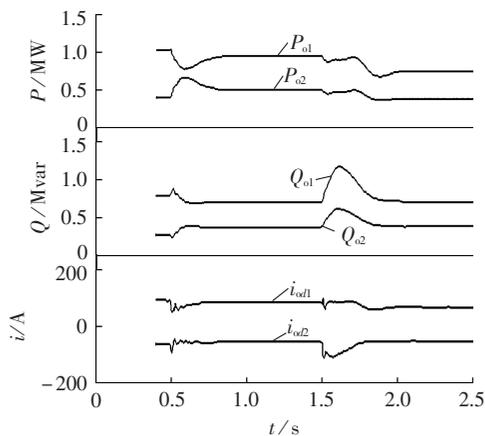


图10 微电源孤岛运行时的响应(本文控制方法)

Fig.10 Response of micro-source operating in island mode(proposed control strategy)

文提出的控制方法不会改变稳态的功率分配机制,同时微电源对扰动的暂态响应有很好的阻尼特性;1.5 s后由于接入异步电机,2个微电源有功出力降低。图11所示的负荷端频率波动范围较小,由于1.5 s接入异步电机,频率略高于50 Hz。

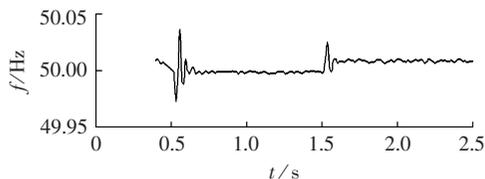


图11 负荷端频率(本文控制方法)

Fig.11 Frequency of load node(proposed control strategy)

### 3 结论

本文针对微电网孤岛模式下传统下垂控制的不足,提出了采用自适应前馈补偿的改进控制方法。采用小信号模型分析,加入最小二乘估计能有效克服微电网孤岛运行时的不确定扰动;有效改善了微电网内部动态特性变化时的稳定性问题,并能防止系统发生振荡。仿真结果证明了该方法的有效性。

### 参考文献:

- [1] LASSETER R H. Smart distribution:coupled microgrids[J]. Proceedings of the IEEE,2011,13(8):1074-1082.
- [2] 余贻鑫,栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报,2009,29(34):1-6.  
YU Yixin,LUAN Wengeng. Smart grid and its implementations [J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(34):1-6.
- [3] 于慎航,孙莹,牛晓娜,等. 基于分布式可再生能源发电的能源互联网系统[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):104-108.  
YU Shenhang,SUN Ying,NIU Xiaona,et al. Energy Internet system based on distributed renewable energy generation[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):104-108.
- [4] 张建华,黄伟. 微电网运行控制与保护技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010:86-93.
- [5] LASSETER R H,PIAGI P. Autonomous control of microgrids [C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. Montreal,

Canada:IEEE,2006:1-8.

- [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.  
SUN Xiaofeng,LÜ Qingqiu. Improved PV control of grid-connected inverter in low voltage micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(8):77-84.
- [7] KARIMI H,DAVISON E J,IRAVANI R. Multivariable servomechanism controller for autonomous operation of a distributed generation unit:design and performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(2):853-865.
- [8] GUERRERO J M,de VICUNA L G,MATAS J,et al. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2005,52(4):1126-1135.
- [9] 范元亮,苗轶群,江全元,等. 基于下垂控制结构的微电网机组控制设计[J]. 电力自动化设备,2012,32(6):100-104.  
FAN Yuanliang,MIAO Yiqun,JIANG Quanyuan,et al. Generator control design based on droop control architecture for microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(6):100-104.
- [10] 张明锐,杜志超,黎娜,等. 高压微网孤岛运行时频率稳定控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):20-26.  
ZHANG Mingrui,DU Zhichao,LI Na,et al. Control strategies of frequency stability for islanding high-voltage microgrids[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(25):20-26.
- [11] DELGHAHI M B,YAZDANI A. An adaptive feedforward compensation for stability enhancement in droop-controlled inverter-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(3):1764-1773.
- [12] 霍群海,唐西胜. 微电网与公共电网即插即用技术研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):105-111.  
HUO Qunhai,TANG Xisheng. Plug-and-play technology applied in microgrid and utility grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7):105-111.
- [13] 范元亮,苗逸群. 基于下垂控制结构微电网小扰动稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(4):1-7.  
FAN Yuanliang,MIAO Yiqun. Small signal stability analysis of microgrid droop controlled power allocation loop[J]. Power System Protection and Control,2012,40(4):1-7.
- [14] LIN Ye,SUN Haibo,SONG Xuri,et al. Dynamic modeling of a hybrid wind/solar/hydro microgrid in EMTP/ATP[J]. Renewable Energy,2012,39(1):96-106.
- [15] 曾正,赵荣祥,杨欢. 基于奇异熵 TLS-ESPRIT 算法的微电网小信号稳定性分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):7-12.  
ZENG Zheng,ZHAO Rongxiang,YANG Huan. Small signal stability based on singular entropy and TLS-ESPRIT algorithm for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):7-12.
- [16] ANDERSON R N,BOULANGER A,POWELL W B,et al. Adaptive stochastic control for the smart grid[J]. Proceedings of the IEEE,2011,99(6):1098-1115.

### 作者简介:



胡雯

胡雯(1987-),女,湖北宜昌人,博士研究生,从事智能配电网运行与控制方面的研究(E-mail:huwen@whu.edu.cn);

孙云莲(1962-),女,浙江临海人,教授,博士研究生导师,从事电力系统新能源技术、电能质量分析、智能电网方面的研究。

# 复数域中晶闸管-电动机系统复杂瞬态的数值计算

崔学深,张自力,李和明

(华北电力大学 电气与电子工程学院,北京 102206)

**摘要:** 针对三相交流调压电路的晶闸管-电动机系统中电动机的各种复杂瞬态,提出了一种在复数域中求解电动机运行行为的数值计算方法,与传统时域数值计算相比,该方法能够充分利用电动机空间矢量模型阶数较低的优点,减少状态变量个数,有利于电动机复杂瞬态过程计算的简化。基于异步电动机的空间矢量数学模型,在复数域中推导出电动机各种复杂瞬态下的状态电压方程;以一种系统供电电源的快速切换为例,使用四阶龙格-库塔法在复数域中对所推导的状态方程进行数值计算,给出定子电流空间矢量轨迹及其对应的三相电流波形图。实测结果验证了所提复数域数值计算方法和所推导的状态方程的正确性和可行性。

**关键词:** 晶闸管-电动机系统; 瞬态; 复数域; 空间矢量; 状态方程; 计算; 电动机

**中图分类号:** TM 346

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.07.019

## 0 引言

晶闸管作为开关器件的三相交流调压电路,是一类仅改变电压大小而不改变频率的交流/交流电压变换器<sup>[1]</sup>,其把晶闸管开关器件串接在交流电源和交流负载之间,通过改变晶闸管的通、断状态,控制负载上的电压波形。该电路输出的是三相恒频变压交流电,通常与三相异步电动机结合组成晶闸管-电动机系统,用于控制施加在电动机定子端的电压,从而实现异步电动机的变压调速<sup>[2]</sup>、软启动<sup>[3-6]</sup>、重合闸<sup>[7-9]</sup>、软投入<sup>[10]</sup>、电源切换<sup>[11-13]</sup>、抽油机断续供电节能<sup>[14-16]</sup>、星角节能控制<sup>[17]</sup>等。显然,在这些应用中晶

闸管-电动机系统结构相同,但其控制目的不同,有的是为了调节电动机的转速,有的是为了抑制过渡过程中的冲击电流,有的则是为了控制电动机的电功率以实现节能。然而,通过分析可以发现,它们的共同点是在控制策略实施中电动机均出现多种瞬态过程,包括3种两相不对称瞬态、1种三相对称瞬态和1种定子端不接电源时的电机转子自由运动过程。

有关晶闸管-电动机系统及电动机的复杂瞬态,已经有很多文献进行了研究。这些文献大多是在时域中进行分析的<sup>[2,4-5,9]</sup>,仅部分文献在复数域中使用空间矢量对其进行探讨分析,但是使用的方法主要是解析计算法<sup>[3,7-8,11]</sup>和 MATLAB/Simulink 模块仿真法<sup>[12-13,17]</sup>,还未有相关文献在复数域中对电动机各种复杂瞬态的状态方程和数值计算进行讨论。

由文献<sup>[18-22]</sup>可知,空间矢量能够有效替代一组三相系统变量,且具有一定的物理意义,其轨迹能

收稿日期:2013-12-05;修回日期:2014-05-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51077048);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(13XS06)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51077048) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(13XS06)

## Control strategy of inverter-based micro-sources in island mode

HU Wen, SUN Yunlian

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** As the traditional droop control strategy depends greatly on the droop coefficient and grid dynamic characteristics, an improved droop control strategy is proposed for the microgrid operating in island mode. The adaptive feedforward compensation is applied in the dynamic decoupling of micro-sources and microgrid to enhance the stability and robustness of dynamic system. The small-signal model is employed in the analysis of system stability and the recursive least-square identification algorithm is used in the operating point estimation to make the control system self-adaptive. The proposed control strategy is suitable for the parallel operation and power sharing of multiple inverter-based micro-sources. A simulation model of microgrid is built with MATLAB/Simulink and the simulative results show that, the proposed control strategy responds quickly to the variation of microgrid internal dynamic characteristics to prevent the system transient oscillation when the micro-sources are renewable energy generations.

**Key words:** microgrid; islanded operation; adaptive feedforward compensation; droop control; small-signal model; recursive least-square identification