

含多微源的微电网离网运行小信号稳定性分析

李 洋^{1,2}, 张 辉^{1,2}, 苏 冰¹, 贺大为¹, 张玉治¹, 柴建云³

(1. 西安理工大学 电气工程系, 陕西 西安 710048;

2. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

3. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 建立含同步发电机和逆变器微源接口的微电网小信号分析模型。各微源接口首先在本地坐标系上建模, 模型忽略同步发电机定子磁链和逆变器电流环等快速动态过程, 然后通过网络方程将微源接口和负荷变换到统一旋转坐标轴, 最后线性化得到微电网小信号分析模型。利用模型分析微电网离网运行时电压源换流器分别采用 PQ 下垂控制和 PV 下垂控制策略时同步机网络参数及控制器参数变化对微电网稳定性和动态特性的影响。采用 MATLAB/Simulink 构建时域仿真模型进行仿真研究, 验证了所建模型的可行性。

关键词: 微电网; 微源; 小信号分析; 网络方程; 动态模型; 稳定性; 控制

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.01.024

0 引言

风力发电和光伏发电等大量功率输出不确定、不稳定且不可调度的微源并入大电网, 对电网运行、控制、保护等方面产生了深刻的影响, 故包含分布式发电、储能、负荷等的微电网成为国内外研究热点^[1-3]。

微电网(尤其是离网模式)能否可靠运行的重要问题之一是不能保持小信号稳定^[4]。微电网的小信号模型不仅要考虑传统的同步发电机模型, 还需将含有电力电子接口的微源以及网络参数的影响考虑在内, 这使得微电网小信号干扰的分析复杂度增大。文献[2]分析了逆变型分布式发电的微电网小信号动态模型, 为控制器参数的优化设计提供依据。文献[5]建立了电压源换流器(VSC)的全阶模型, 详细阐述了 PV 控制器的设计方法、P-f 下垂控制器及功率限制环节的设计方法和 Q-U 下垂控制器的设计方法。文献[6]建立了包含光伏电池、燃料电池、微燃机的微电网小信号干扰分析模型, 各逆变器首先在本地坐标轴上单独建立模型, 然后合并到统一坐标轴上。该模型考虑了逆变器的低频和高频动态、网络和负载动态, 并采用灵敏度分析来获取控制参数。

收稿日期: 2013-12-28; 修回日期: 2014-09-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277150, 51307140); 电力设备电气绝缘国家重点实验室开放基金资助项目(EIPE12209); 陕西省工业攻关项目(2013K07-05); 陕西省教育厅产业化培育项目(14JF020); 西安市科技计划项目(CX1256); 西安市碑林区科技计划项目(GX1210)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277150, 51307140), State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(EIPE12209), the Industrial Research Project of Shaanxi(2013K07-05), Industrialization Cultivation-Item of Shaanxi Province Educational Department(14JF020), the Foundation for Science and Technology Research Project of Xi'an(CX1256) and the Foundation for Science and Technology Research Project of Xi'an Beilin(GX1210)

文献[7]提出了含同步发电机和逆变器接口的微电网小干扰分析的降阶模型, 将各部分统一到公共坐标轴上形成全微电网模型。

本文建立包含同步发电机和 VSC 接口的微电网小信号干扰机电暂态分析模型; 在 PQ 和 PV 不同下垂控制策略时, 采用特征根分析方法分析网络参数以及控制器参数变化对微电网稳定性及动态特性的影响, 构建 MATLAB/Simulink 时域仿真模型进行仿真研究。

1 微电网建模

1.1 微电网结构

本文构建的典型微电网结构如图 1 所示。微电网额定电压为 380 V, 包含的典型微源为风力发电机和储能装置, 分别通过同步发电机和 VSC 并入电网, 负载为 R-L。

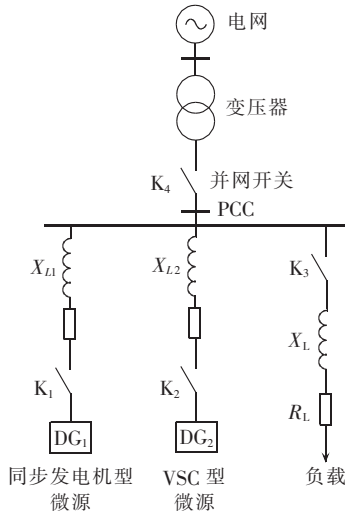


图 1 微电网小信号稳定性分析结构图
Fig.1 Structure of microgrid for small-signal stability analysis

各微源接入微电网的原理如图 2 所示,分别通过线路阻抗接入到母线。

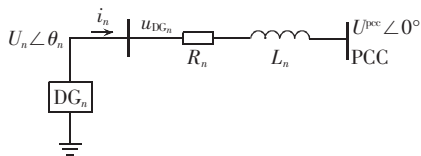


图 2 微源接入微电网原理图

Fig.2 Schematic diagram of microsource connecting to microgrid

由图 2 可知,各微源接口在同一旋转坐标系下的网络方程为:

$$\begin{bmatrix} u_d^{DG_i} - u^{pcc} \\ u_q^{DG_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_i & -X_i \\ X_i & R_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^{Li} \\ i_q^{Li} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $u_d^{DG_i}$ 、 $u_q^{DG_i}$ 分别为各微源机端电压的 d 、 q 轴分量; i_d^{Li} 、 i_q^{Li} 分别为各微源出口侧线路电流的 d 、 q 轴分量; u^{pcc} 为微电网 PCC 处电压; R_i 和 X_i 分别为各线路电阻和电抗。

1.2 微源坐标变换

将统一参考坐标轴选在 PCC,并定义 PCC 的电压矢量方向为统一坐标轴的 d 轴方向^[8],如图 3 所示。

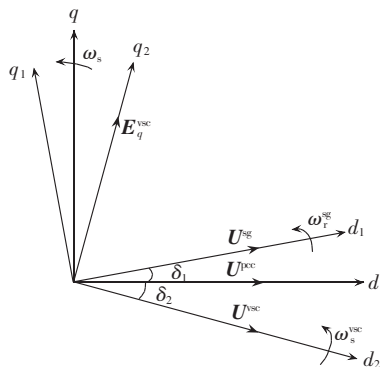


图 3 本地坐标轴和统一坐标轴变换示意图

Fig.3 Schematic diagram of transformation from local coordinates to unified rotational coordinates

同步发电机的本地坐标轴 d_1 定向在其定子电压 U^s 上,以转子转速 ω_r^s 旋转。VSC 模型采用基于电网电压定向的方式,其本地坐标轴 d_2 定向在 VSC 网侧电压矢量 U^{vsc} 上,以速度 ω_s^{vsc} 旋转。

将 DG_1 、 DG_2 本地坐标系的各物理量变换到统一坐标系的变换方程为^[6]:

$$\mathbf{F}^g = \mathbf{T}^i \mathbf{F}^i \quad (2)$$

其中, $\mathbf{F}^g = [F_d \ F_q]^T$ 为统一坐标系上变量的 d 、 q 轴分量; $\mathbf{F}^i = [F_{d_i} \ F_{q_i}]^T$ 为各微源本地坐标轴上变量的 d 、 q 轴分量;变换阵 $\mathbf{T}^i$ 可表示为式(3)。

$$\mathbf{T}^i = \begin{bmatrix} \cos \delta_i & -\sin \delta_i \\ \sin \delta_i & \cos \delta_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.3 同步发电机小信号分析模型

进行微电网小信号干扰机电暂态分析时,忽略同

步发电机定子绕组电磁暂态,只考虑转子运动方程、励磁控制器电磁暂态,得到同步发电机的微电网分析模型,用同步发电机五阶方程加一阶励磁控制器方程来表示^[8]:

$$\begin{cases} u_d^s = E_d^{s'} - X_q^{s'} i_q^s + R_s^s i_d^s \\ u_q^s = E_q^{s'} + X_d^{s'} i_d^s + R_s^s i_q^s \\ T_{d0}^{s'} p E_q^{s'} = E_f^s - \left(\frac{X_d^{s'} - X_q^{s'}}{X_d^{s'} - X_q^{s'}} E_q^{s'} + \frac{X_d^{s'} - X_q^{s'}}{X_d^{s'} - X_q^{s'}} E_q^{s'} \right) \\ T_{d0}^{s'} p E_q^{s'} = -E_q^{s'} + E_q^{s'} - (X_d^{s'} - X_q^{s'}) i_d^s \\ T_{q0}^{s'} p E_d^{s'} = -E_d^{s'} + (X_q^{s'} - X_q^{s'}) i_q^s \\ 2H^s \frac{d\omega_r^s}{dt} = T_m^s - [E_q^{s'} i_q^s + E_d^{s'} i_d^s - (X_d^{s'} - X_q^{s'}) i_d^s i_q^s] - D^s \omega_r^s \\ \frac{d\delta^s}{dt} = \omega_r^s - 1 \\ T_A p u_f^s = -u_f^s + K_A (U^{sref} - U^s) \end{cases} \quad (4)$$

其中, u_d^s 、 u_q^s 和 i_d^s 、 i_q^s 分别为同步电机定子电压和电流的 d 、 q 轴分量; $E_d^{s'}$ 、 $E_q^{s'}$ 、 $X_d^{s'}$ 、 $X_q^{s'}$ 、 E_f^s 、 $E_q^{s'}$ 、 $X_d^{s'}$ 、 $X_q^{s'}$ 分别为同步电机 d 、 q 轴瞬变电势、电抗和超瞬变电势、电抗; R_s^s 、 $X_d^{s'}$ 、 $X_q^{s'}$ 分别为定子绕组电阻、电抗; E_f^s 、 u_f^s 分别为励磁绕组电势和电压; $T_{d0}^{s'}$ 、 $T_{q0}^{s'}$ 分别为 d 、 q 轴开路暂态时间常数; H^s 为惯性时间常数; K_A 和 T_A 分别为励磁控制器的比例系数和时间常数; T_m^s 为原动机输出机械力矩; $T_{d0}^{s'}$ 、 $T_{q0}^{s'}$ 分别为 d 、 q 轴超暂态开路时间常数; U^{sref} 为同步发电机励磁电压参考值; U^s 、 D^s 、 δ^s 分别为同步发电机的机端电压、阻尼系数和转子角。

将式(4)在其本地坐标系线性化可将同步发电机的小信号分析模型表示成^[7,9]:

$$\Delta \dot{\mathbf{X}}_{G1} = \mathbf{A}_{G1} \Delta \mathbf{X}_{G1} + \mathbf{B}_{G1} \Delta u_{G1} + \mathbf{C}_{G1} \Delta u^{pcc} \quad (5)$$

其中, $\Delta \mathbf{X}_{G1} = [\Delta \omega_r \ \Delta \delta \ \Delta E_q^{s'} \ \Delta E_q^{s'} \ \Delta E_d^{s'} \ \Delta E_f^s]$ 为同步发电机的状态变量; $\Delta u_{G1} = \Delta T_m^s$ 为同步发电机输入变量。

1.4 VSC 小信号分析模型

微电网中大量的微源如光伏发电、储能装置等都是通过 VSC 接入电网的。按照不同控制目标,VSC 离网运行时的控制策略有 U/f 控制、PQ 下垂控制和 PV 下垂控制等^[10-12]。本文对 PQ 下垂控制和 PV 下垂控制进行对比分析,得到 2 种不同控制策略下 VSC 小信号稳定性模型。

1.4.1 PQ 下垂控制小信号分析模型

当微电网离网运行时,PQ 下垂控制算法采样 VSC 输出电压和频率,并根据下垂曲线计算出有功和无功功率参考值,下垂曲线方程表达为:

$$\begin{cases} P^{ref} = P_0 + k_{pf}(f_0 - f) \\ Q^{ref} = Q_0 + k_{qu}(U_0 - U) \end{cases} \quad (6)$$

其中, P_0 、 P^{ref} 和 Q_0 、 Q^{ref} 分别为有功和无功功率额定

值、参考值; U_0 、 U 和 f_0 、 f 分别为电压幅值和频率的额定值、实际值; k_{pf} 为 P - f 下垂曲线的斜率; k_{qu} 为 Q - U 下垂曲线的斜率。

PQ 下垂控制框图如图 4 所示。

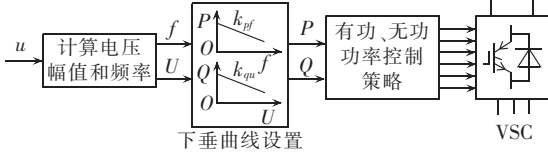


图 4 PQ 下垂控制框图

Fig.4 Block diagram of PQ droop control

功率外环状态方程为:

$$p \begin{bmatrix} x_p \\ x_q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} P^{vsc} \\ Q^{vsc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P^{ref} \\ Q^{ref} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, x_p 、 x_q 分别为有功和无功 PI 控制器状态变量; P^{vsc} 、 Q^{vsc} 分别为 VSC 输出的有功和无功功率。

将方程(6)、(7)联立,并在本地坐标系线性化,得到 VSC 的小信号分析模型为:

$$\Delta \dot{X}_{G2} = A_{G2}^{PQ} \Delta X_{G2} + B_{G2}^{PQ} \Delta u_{G2} + C_{G2}^{PQ} \Delta u^{pcc} \quad (8)$$

其中, $\Delta X_{G2} = [\Delta x_p \ \Delta x_q \ \Delta \omega_s^T]^T$ 为 VSC 的 PQ 下垂控制状态变量; $\Delta u_{G2} = [\Delta P^{ref} \ \Delta Q^{ref}]^T$ 为 PQ 下垂控制的输入变量。

1.4.2 PV 下垂控制小信号分析模型

基于电压调节的 PV 下垂控制如图 5 所示,控制 VSC 的无功功率可调节 PCC 的电压。当微电网离网运行时, PV 下垂控制 VSC 输出频率和无功功率,并根据下垂曲线计算出有功功率和电压参考值。下垂曲线方程表达为:

$$\begin{cases} P^{ref} = P_0 + k_{pf}(f_0 - f) \\ U^{ref} = U_0 + k_{qu}(Q_0 - Q) \end{cases} \quad (9)$$

其中, k_{pf} 、 k_{qu} 分别为 P - f 、 U - Q 下垂曲线斜率。

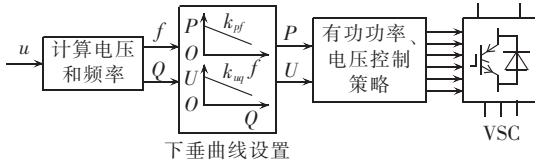


图 5 PV 下垂控制框图

Fig.5 Block diagram of PV droop control

VSC 的有功功率和电压外环控制方程为:

$$p \begin{bmatrix} x_p \\ x_u \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} P^{vsc} \\ U^{vsc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P^{ref} \\ U^{ref} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, x_u 为 VSC 电压外环控制器的状态变量。

将方程(9)、(10)联立,并在本地坐标系线性化,得到 VSC 小信号分析模型为:

$$\Delta \dot{X}_{G2} = A_{G2}^{PU} \Delta X_{G2} + B_{G2}^{PU} \Delta u_{G2} + C_{G2}^{PU} \Delta u^{pcc} \quad (11)$$

其中, $\Delta X_{G2} = [\Delta x_p \ \Delta x_u \ \Delta \omega_s^T]^T$ 为 VSC 的 PV 下垂控制状态变量; $\Delta u_{G2} = [\Delta P^{ref2} \ \Delta u^{ref2}]^T$ 为 PV 下垂控制的输

入变量。

1.5 微电网系统小信号分析模型

本文主要针对微电网离网运行进行分析,微电网离网运行时负载方程为^[13-15]:

$$\begin{bmatrix} u^{pcc} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_L & -X_L \\ X_L & R_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^{load} \\ i_q^{load} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, R_L 、 X_L 分别为负载等效电阻和电抗; i_d^{load} 、 i_q^{load} 分别为负载电流的 d 、 q 轴分量。

由网络结构可得微电网网络方程为:

$$\begin{bmatrix} i_d^{load} \\ i_q^{load} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d^{sg} \\ i_q^{sg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_d^{vsc} \\ i_q^{vsc} \end{bmatrix} \quad (13)$$

将网络方程(1)和坐标变换方程(2)以及各微源小信号分析模型式(5)与(8)或(11)联立,消去 Δu^{pcc} ,化简得到微电网的状态矩阵 A 和输入矩阵 B 为:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} A_{G1} + C_{G1}H_1 & C_{G1}H_3 \\ C_{G3}H_1 & A_{G3} + C_{G3}H_3 \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} B_{G1} + C_{G1}C_1 & G_{G1}G_3 \\ C_{G3}G_1 & B_{G3} + C_{G3}G_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

2 微电网仿真分析

仿真时,同步发电机线路阻抗 $R_1 + jX_1 = 0.04 + j0.418$ p.u., VSC 线路阻抗 $R_2 + jX_2 = 0.212 + j0.527$ p.u.,额定电压为 380 V/50 Hz。VSC 的 P^{ref} 为 100 kW, Q^{ref} 为 150 kvar。

2.1 逆变器 PQ 下垂控制

a. 当同步发电机励磁调节器比例系数 K_A 从 0.1 增至 2 时,主导特征根轨向左半平面移动,见图 6。

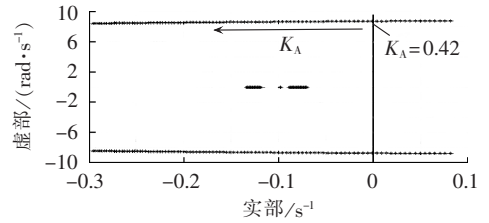


图 6 PQ 控制下 K_A 变化时微电网主导特征根轨迹

Fig.6 Trace of system dominant eigenvalue vs. K_A under PQ control

当 $K_A < 0.42$ 时,采用 PQ 下垂控制的 VSC 无法保持稳定运行。

利用 MATLAB/Simulink 构建图 1 所示的离网运行模型,2 s 时在负荷侧施加功率扰动,得到同步发电机输出的有功和无功功率随 K_A 变化的响应,见图 7。

当 K_A 较小时,同步发电机输出功率无法维持稳定,输出功率振荡,仿真结果和特征根分析结果一致。这可以从物理解释:当 $K_A < 0.42$ 时,同步发电机无法输出足够的无功功率维持输出电压恒定,导致微电网不稳定。

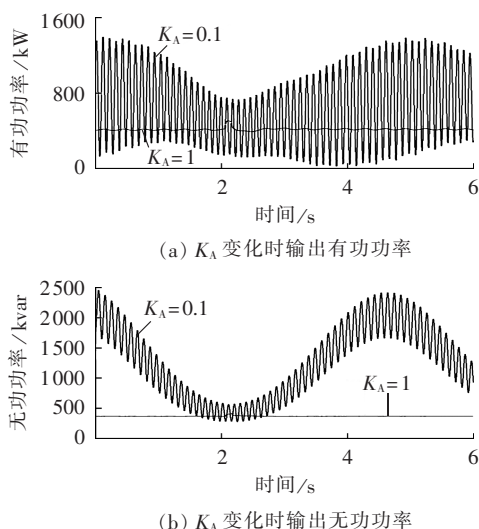


图 7 PQ 控制下 K_A 变化时的有功功率和无功功率时域仿真波形

Fig.7 Time-domain simulative curves of active and reactive powers vs. K_A under PQ control

b. 当同步发电机线路阻抗 X_1 从 0.0109 p.u. 增大至 0.7397 p.u. 时,主导特征根向右半平面移动,当 $X_1 > 0.6293$ p.u. 时,主导特征根已位于右半平面,如图 8 所示,微电网失去稳定。

图 9 中,当 X_1 较小时,同步发电机的有功功率

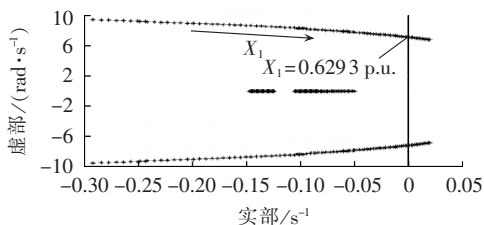


图 8 PQ 控制下 X_1 变化时的主导特征根轨迹
Fig.8 Trace of system dominant eigenvalue vs. X_1 under PQ control

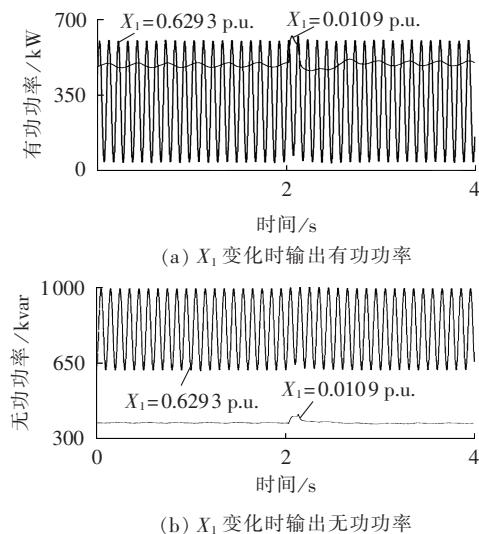


图 9 X_1 变化时同步发电机输出有功和无功功率时域仿真图

Fig.9 Time-domain simulative curves of active and reactive powers vs. X_1

和无功功率能够稳定输出;当 $X_1 > 0.6923$ p.u. 时,同步发电机输出的功率振荡。

2.2 逆变器 PV 下垂控制

a. 与 PQ 控制策略类似, K_A 从 0.1 增大至 2 时,主导特征根向左半平面移动,如图 10 所示。

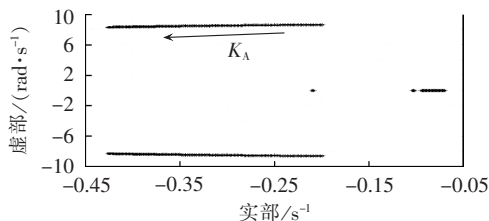


图 10 PV 控制下 K_A 变化时的主导特征根轨迹
Fig.10 Trace of system dominant eigenvalue vs. K_A under PV control

当 K_A 减小到 0.1 时,采用 PV 控制的微电网仍能维持稳定,而采用 PQ 控制的微电网此时已失去稳定。从图 11 可看出,在 K_A 变化时,PV 控制对微电网输出功率支撑作用优于 PQ 控制。

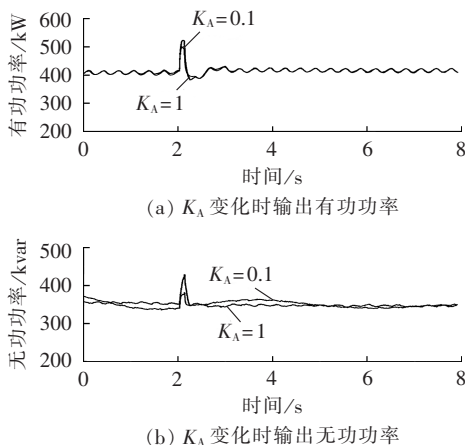


图 11 PV 控制下 K_A 变化时同步发电机输出的有功和无功功率的时域仿真图

Fig.11 Time-domain simulative curves of active and reactive powers vs. K_A under PV control

b. 同理, X_1 从 0.0109 增大至 0.7397 p.u. 时,主导特征根向右半平面移动,如图 12 所示。

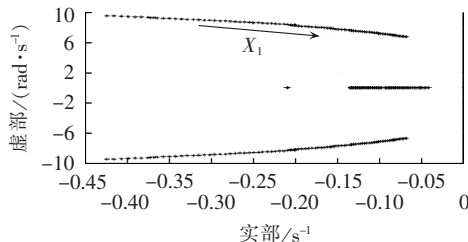


图 12 PV 控制下 X_1 变化时主导特征根轨迹
Fig.12 Trace of system dominant eigenvalue vs. X_1 under PV control

当同步发电机 X_1 增大到 0.6293 p.u. 时,采用 PV 控制的微电网能维持稳定,而采用 PQ 控制的微电网此时已失去稳定。从图 13 可看出,在 X_1 变化时,

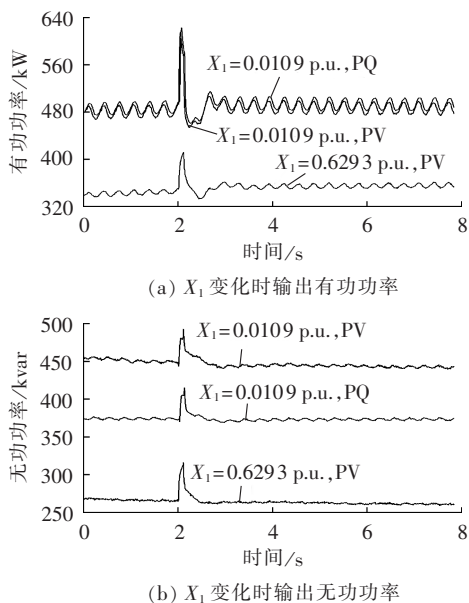


图 13 PV 控制下 X_1 变化时同步机输出的有功和无功功率的时域仿真图

Fig.13 Time-domain simulative curves of active and reactive powers vs. X_1 under PV control

PV 控制对微电网功率支撑作用优于 PQ 控制。

3 结论

本文研究了含同步发电机和 VSC 典型接口的微电网小信号模型,分别建立了 VSC 的 PQ 下垂控制和 PV 下垂控制的小信号分析模型。分析不同控制策略下,控制器参数和网络参数变化对微电网稳定性的影响,得出微电网中 VSC 采用 PV 下垂控制时,稳定性优于 PQ 下垂控制的结论,在 MATLAB/Simulink 中验证了微电网模型建立和特征根分析的正确性。

参考文献:

- [1] 王旭斌,李鹏,窦鹏冲,等. 用于微网孤岛运行的新型功率控制方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):122-128,134.
WANG Xubin,LI Peng,DOU Pengchong,et al. Power control method for autonomous microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(6):122-128,134.
- [2] 肖朝霞,王成山,王守相. 含多微型电源的微电网小信号稳定性分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(6):81-85.
XIAO Zhaoxia,WANG Chengshan,WANG Shouxiang. Small-signal stability analysis of microgrid containing multiple micro sources[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(6):81-85.
- [3] 梁建钢,金新民,吴学智,等. 基于下垂控制的微电网变流器并网运行控制方法改进[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):59-65.
LIANG Jiangang,JIN Xinmin,WU Xuezhi,et al. Improved grid-connection operation of microgrid converter based on droop control [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4):59-65.
- [4] 丁明,张颖媛,茆美琴. 微电网研究中的关键技术[J]. 电网技术,2009,33(11):6-11.
DING Ming,ZHANG Yingyuan,MAO Meiqin. Key technologies for microgrids being researched [J]. Power System Technology,

2009,33(11):6-11.

- [5] 张建华,苏玲,刘若溪,等. 逆变型分布式电源微电网小信号稳定性动态建模分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(22):97-102.
ZHANG Jianhua,SU Ling,LIU Ruoxi,et al. Small-signal dynamic modeling and analysis of a microgrid composed of inverter-interfaced distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(22):97-102.
- [6] POGAKU N,PRODANOVIC M,GREEN T C. Modeling,analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2007,22(2):613-625.
- [7] 王阳,鲁宗相,闵勇,等. 基于降阶模型的多电源微电网小干扰分析[J]. 电工技术学报,2012,27(1):1-8.
WANG Yang,LU Zongxiang,MIN Yong,et al. Small-signal analysis of micro-grid with multiple micro sources based on reduced order model in islanding operation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(1):1-8.
- [8] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:29-59.
- [9] 王康,金宇清,甘德强,等. 电力系统小信号稳定分析与控制综述[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):10-19.
WANG Kang,JIN Yuqing,GAN Deqiang,et al. Survey of power system small signal stability and control[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(5):10-19.
- [10] 陈卫民,陈国呈,崔开涌,等. 分布式并网发电系统在离网时的运行控制[J]. 电力系统自动化,2008,32(9):88-91.
CHEN Weimin,CHEN Guocheng,CUI Kaiyong,et al. Running control of grid-connected dispersed generation systems in islanding situation[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(9):88-91.
- [11] DIMEAS A L,HATZIARGYRIOU N D. Operation of a multiagent system for microgrid control[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2005,20(3):1447-1455.
- [12] LOPES J A P,MOREIRA C L,MADUREIRA A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2006,21(2):916-924.
- [13] KATIRAEI F,IRAVANI M R,LEHN P W. Small-signal dynamic model of a micro-grid including conventional and electronically interfaced distributed resources[J]. IET Generation,Transmission and Distribution,2007,1(3):369-378.
- [14] 苏玲. 微电网控制及小信号稳定性分析与能量管理策略[D]. 北京:华北电力大学,2011.
SU Ling. Small-signal stability analysis of microgrid control and strategy for microgrid energy management[D]. Beijing:North China Electric Power University,2011.
- [15] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA:McGraw-Hill,1994:471-485.

作者简介:



李 洋

李 洋(1987—),男,陕西咸阳人,硕士,主要研究方向为微电网接口稳定性;

张 辉(1963—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,博士后,主要研究方向为新型电能储存装置与新能源发电、电动汽车与 LED 照明等(E-mail:zhangh@xaut.edu.cn)。

Small-signal stability analysis of islanded microgrid with microsources

LI Yang^{1,2}, ZHANG Hui^{1,2}, SU Bing¹, HE Dawei¹, ZHANG Yuzhi¹, CHAI Jianyun³

(1. Department of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A small-signal stability analysis model is built for a microgrid with the microsource interfaces for synchronous generator and inverter. By ignoring the dynamic transient processes of synchronous generator stator flux and inverter current loop, the microsource interfaces are modeled in local coordinates, which, together with the loads, are then transformed into the unified rotational coordinates by network equations and finally linearized into the small-signal stability analysis model. With the built model, the influence of network or controller parameter variation on the stability and performances of islanded microgrid is analyzed when its voltage source converter applies PQ and PV droop control strategies respectively. The time-domain simulation model is established with MATLAB/Simulink and the correctness of the small-signal stability analysis model is verified.

Key words: microgrid; microsources; small-signal analysis; network equation; dynamic model; stability; control

(上接第 158 页 continued from page 158)

Multi-level voltage control partitioning based on multi-objective modularity

SONG Yue¹, CHENG Haozhong¹, ZHANG Jian², SHAO Yao², SUN Quancai¹, LI Shiyang³

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

3. Iowa State University, Ames IA 50010, USA)

Abstract: A definition of electrical distance for measuring the coupling degree of var source control and an index of multi-objective modularity for evaluating the partitioning quality are proposed, based on which, a tri-stage method of multi-level network partitioning is developed. In the coarsening stage, the dimensionality of clustering data is reduced to lower the problem scale; in the partitioning stage, an optimal scheme considering both intra-regional controllability and inter-regional decoupling performance is obtained by the agglomerative clustering based on the multi-objective modularity index; and in the refining stage, the boundary nodes are adjusted to further optimize the partitioning scheme. The connectivity among sub-regions is guaranteed in the calculation process. Case study shows that, the high-quality partitioning scheme proposed by the developed method is applicable to the network partitioning of large-scale system for voltage control, verifying its correctness and feasibility.

Key words: network partitioning for voltage control; voltage control; multi-level partitioning; agglomerative clustering; multi-objective modularity; optimization