

鲁棒下垂 VSG 与 SG 小信号模型的一致性比较

张昌华¹, 刘倪¹, 陈昕², 叶圣永³, 陈树恒¹, 刘群英¹

(1. 电子科技大学 机械与电气工程学院, 四川省 成都市 611731;

2. 重庆邮电大学 自动化学院, 重庆市 400065;

3. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川省 成都市 611041.)

Comparative Research for Small Signal Models of Robust Droop Control VSG and SG

ZHANG Chang-hua¹, LIU Ni¹, CHEN Xin², YE Sheng-yong³, CHEN Shu-heng¹, LIU Qun-ying¹

School of Mechanical and Electrical Engineering, UESTC, Chengdu 611731;

2. School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications,

Chongqing 400065;

3. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, China.)

ABSTRACT: Inverter is one of the main electric generation devices in microgrid, which control strategy has various forms. Current research focuses on comparison between inverters' strategies, and analyzes their built-in relationship and effect on system stability. In this paper, an investigation is conducted to compare small signal models of SG and robust droop VSG. It shows that these two have similar control structures but with different values for the special parameters. This leads to they have different dynamic characteristics. The correctness of the conclusion is verified in PSCAD/EMTDC.

This work is partially supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (ZYGX2015J104), SEM, and the National Natural Science Foundation of China (No.51677020).

KEY WORD: small signal model; VSG; robust droop controller; inverter; Synchronous Generator.

摘要: 逆变器是微电网中常见发电设备, 具有多种形式各异的控制策略。已有研究侧重于逆变器之间的控制策略比较, 分析它们的内在联系和对系统稳定性的影响。本研究对鲁棒下垂控制 VSG 和同步发电机(Synchronous Generator, SG)的小信号模型进行了建模、分析方面的工作。研究表明二者在控制结构上具有一致性。但因逆变器和 SG 的工作原理不同, 在具体控制参数上是不同的。这导致两种发电设备具有不同的动态特性。最后, 通过

PSCAD/EMTDC 仿真验证了结论的正确性。

关键词: 小信号模型; VSG; 鲁棒下垂控制器; 逆变器; 同步发电机

0 引言

作为分布式电源接入电网的重要接口形式, 并网逆变器凭借控制灵活、适应面广、成本相对低廉和使用方便等优点, 得到了广泛应用^[1]。由于分布式电源往往输出功率较小且具有随机性和间歇性, 再加上为数众多, 对电网的运行管理带来极大的挑战。微电网通过将分布式电源、储能和本地负荷整合在一起, 以电网“良好公民”的形式并入电网或者直接离网运行, 成为一种颇具吸引力的可再生能源组网利用形式^[3]。但由于分布式电源输出功率与负荷消耗功率都具有随机性, 且电源和负荷之间的电气距离更短, 因此微网中节点电压幅值和相角差也比大电网更为多变^[2-3]。因此, 微电网虽然系统规模不大, 但其建模、分析和运行管理也并非易事。

处于微电网中的逆变器, 起着类似大电网中 SG 的作用, 其控制策略对系统的稳定性有着重要的影响。在离网运行情况下, 常见的微电网逆变器控制策略有 V_f 控制和下垂控制^[4,5]。

前者在微电网中充当平衡节点的作用，一般由容量最大的一台逆变器担任。后者模拟传统电网 SG 外特性，能够让多台逆变器自动地参与系统调频、调压管理，因而受到了普遍的重视^[6]，成为自治运行微电网逆变器控制器设计的主流思路。但早期的下垂控制，存在功率输出响应速度快、电力电子单元惯性小、逆变器功率分担不均衡等问题，由此出现了各种改进的下垂控制策略。其中，鲁棒下垂控制^[7]、同步逆变器^[8]、虚拟同步发电机 (virtual synchronous generator, VSG)^[9-11] 等较为有名。文献[12]甚至提出了在逆变器控制器中内嵌 SG 机电暂态、电磁暂态的方程，通过双闭环控制的结构，实现逆变器和 SG 动态特性的等效。文献[13]提出在逆变器控制器中模拟 SG 电力系统稳定器 (Power system stabilizer)，引入功率微分项，提高系统阻尼。在逆变器领域的这些研究，反过来也极大地促进和丰富了微电网的发展。

众所周知，在传统大电网中，只有 SG 一种发电设备。经过近百年发展，SG 的数学模型、控制策略和分析方法已为广大的电力工作者所熟知。这种统一的局面，有利于 SG 的设计、制造、测试以及系统层面的分析和控制。但相比之下，微电网中的电源包括 SG、异步发电机、逆变器等。逆变器控制策略的多样性，不利于微电网的建模、分析和运行管理。从系统层面来看，有必要去设计一种统一的、各种特性优良的逆变器控制器。这样就能够加快系统层面的建模方法、分析理论和运行管理技术的研究。目前，学术界对逆变器控制策略的对比研究做了大量的工作，试图厘清各种控制策略之间的联系。基于小信号模型，文献[14]比较了 VSG 和下垂控制的动态特性，指出下垂控制是一种惯性极小的 VSG。类似的结论可见文献[15]。但是，这些研究只是在逆变器控制策略之间进行比较，没有把逆变器和 SG 的特性进行比较。而 SG，也是微电网中一种主要的发电设备。

基于此，本文以鲁棒下垂控制 VSG 为例，通过小信号模型这一常见的逆变器动态特性建模方法^[16]，比较了鲁棒下垂 VSG 和 SG 小信号数学模型上的一致性，并指出了二者的区别。

相关的研究有利于逆变器控制器的设计和微电网的稳定性分析。

1 鲁棒下垂 VSG 并网小信号模型

1.1 VSG 并网及接口电路模型

本文所说的并网 VSG 是指单个 VSG 和微电网连接并发电。此时微电网可以并入大电网运行，也可以孤岛运行。从 VSG 装置研究的角度来看，这两种情况都可以用图 1 所示的单逆变器并网系统来描述。它主要包括分布式电源及储能装置、三相桥式逆变电路、LC 滤波器、VSG 控制器、输电线路和并网节点 $V_{pcc} \angle \alpha$ 。 $V_{pcc} \angle \alpha$ 既可以代表大电网，也可以代表运行于孤岛模式的微电网^[3]。

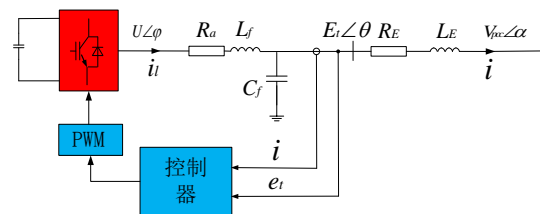


图 1 单逆变器并网系统

Fig. 1 Single inverter grid-connected system

图中： L_f 、 C_f 和 R_a 分别为 LC 滤波电感、滤波电容及滤波电阻； R_E 与 L_E 为逆变器到并网节点 (PCC: Point of Common Coupling) 线路的阻抗； $U \angle \psi$ 、 $E_i \angle \theta$ 、 $V_{pcc} \angle \alpha$ 分别为逆变器控制器输出的 PWM (Pulse Width Modulation) 驱动信号、逆变器端电压 (滤波电容上的电压) 以及系统侧 PCC 点的电压； e_i 和 i 分别为逆变器输出端电压与输出电流的瞬时值。

1.2 LC 滤波器与线路部分的线性化模型

并网逆变器 LC 滤波器及线路阻抗部分的稳态模型为：

$$\begin{cases} e_{dq} = -R_a i_{dq} \pm \omega_0 L_f i_{qd} + u_{dq} \\ e_{dq} = R_E i_{dq} \mp \omega_0 L_E i_{qd} + v_{pccd} \end{cases} \quad (1)$$

式中： ω_0 为额定角频率； $i_{dq} = [i_d \ i_q]$ 为逆变器输出电流 i 在以逆变器控制器自身的 $\omega\text{-}\varphi$ 为参考频率和相位的旋转坐标系下的 dq 轴分量 (本文的 dq 下标均为此含义)； u_{dq} 、 e_{dq} 和 v_{pccd} 分别为逆变器 PWM 调制信号 u 、端电压 e_i 和系统侧 PCC 点电压 v_{pcc} 在同一 $\omega\text{-}\varphi$ 旋转坐标系下的

dq 轴分量。

图 2 给出了 $\omega\text{-}\varphi$ 旋转坐标系下逆变器的输出调制波 u 、端电压 e_t 和 PCC 处电压 v_{pcc} 之间幅值与相位关系。图中 ω_g 为网侧电压的角频率。

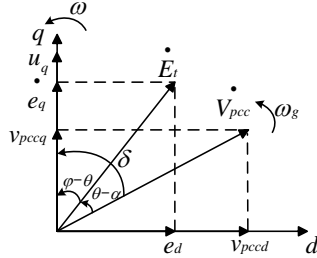


图 2 相平面上各电压之间的相对关系
Fig. 2 Relative position between voltages on phase plane

在忽略系统采样延时与逆变电路中的器件损耗，并将分布式电源及储能装置等效为理想电压源的情况下，调制信号 u 即为逆变器电力电子电路的输出电压。

定义逆变器调制信号 $U\angle\psi$ 与 PCC 母线上电压 $V_{pcc}\angle\alpha$ 之间的相位差角 δ ，有：

$$\begin{cases} \delta = \varphi - \alpha, & \alpha = \omega_0 \int \omega_g dt \\ v_{pccd} = V_{pcc} \times \sin \delta, & v_{pccq} = V_{pcc} \times \cos \delta \end{cases} \quad (2)$$

式中 ω_g 为标幺值。

类似 SG 小信号建模的方法^[17]，联立式(1)消去 e_{dq} 得 i_{dq} 的表达式，代入式(2)。随后线性化,可得：

$$\begin{cases} \Delta i_d = a_1 \Delta \delta + a_2 \Delta u_d + a_3 \Delta V_{pcc} \\ \Delta i_q = b_1 \Delta \delta + b_2 \Delta u_d + b_3 \Delta V_{pcc} \\ \Delta e_d = -R_a \Delta i_d + \omega_n L_f \Delta i_q + \Delta u_d \\ \Delta e_q = -R_a \Delta i_q - \omega_n L_f \Delta i_d + \Delta u_q \end{cases} \quad (3)$$

式中： $a_1 \sim a_3, b_1 \sim b_3$ 的表达式见附录 A。

1.3 鲁棒下垂控制 VSG 控制器部分线性化

文献[7]最早提出了鲁棒下垂控制器。该控制器依然模拟了 SG 的下垂机制，特点是在无功电压环节引入了积分器，使得多个该型逆变器并联运行时可以按设定比例分配输出功率，且功率分配精度不受系统参数（如滤波器的电感值）变化的影响，因此命名为鲁棒下垂控制器。后经我们的研究，发现这种形式的控制器，

较之于经典下垂控制器^[6]，能够用现有的潮流计算方法计算潮流^[19]。而潮流计算是微电网系统分析的基础，因此这是该控制器的另一大优点。在文献[7]的基础上，适度改进，引入虚拟的转子运动方程并增加阻尼系数 K_d ，使之成为 VSG，命名为鲁棒下垂 VSG。如图 3 所示。

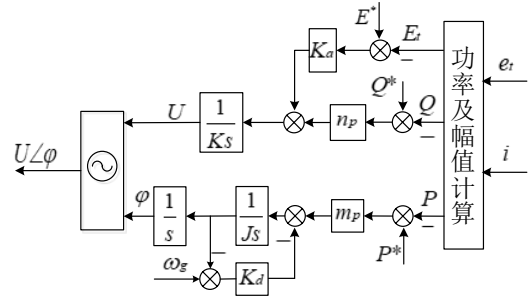


图 3 鲁棒下垂 VSG 控制器
Fig3 Robust droop controller of VSG

图中： m_p 、 n_p 为有功和无功下垂系数； J 、 K_d 代表虚拟转动惯量和阻尼系数，模仿了 SG 转子运动方程和阻尼绕组； K_a 、 K 为端电压反馈系数和电压积分系数； P^* 、 Q^* 、 E^* 、 ω^* 分别为给定的有功功率、无功功率、端电压幅值和额定频率值。

根据图 3，鲁棒下垂 VSG 控制器数学表达式为：

$$\begin{cases} \omega = \frac{1}{J} \int (m_p(P^* - P) + K_d(\omega_g - \omega)) dt \\ u_q = \frac{1}{K} \int (K_a(E^* - E_t) + n_p(Q^* - Q)) dt, & u_d = 0 \\ \varphi = \omega_0 \int \omega dt \end{cases} \quad (4)$$

式中逆变器有功功率 P 、无功功率 Q 可通过瞬时功率理论计算得到。同时还可以获得机端电压幅值 E_t ：

$$\begin{cases} P = e_d i_d + e_q i_q \\ Q = -e_d i_q + e_q i_d \\ E_t = \sqrt{e_d^2 + e_q^2} \end{cases} \quad (5)$$

线性化式(4)~(5)，并结合式(3)，消去变量 Δe_{dq} 、 Δi_{dq} ，建立鲁棒下垂 VSG 小信号模型：

$$\begin{cases}
 \Delta \dot{\omega} = -\frac{m_p}{J} \Delta P - \frac{K_d}{J} \Delta \omega + \frac{K_d}{J} \Delta \omega_s \\
 \Delta \dot{\delta} = \Delta \omega - \Delta \omega_s \\
 \Delta \dot{u}_q = -\frac{K_a}{K} \Delta E_t - \frac{n_p}{K} \Delta Q \\
 \Delta \dot{E}_t = f_1 \Delta \delta + f_2 \Delta u_q + f_3 \Delta V_{pcc} \\
 \Delta \dot{P} = c_1 \Delta \delta + c_2 \Delta u_q + c_3 \Delta V_{pcc} \\
 \Delta \dot{Q} = d_1 \Delta \delta + d_2 \Delta u_q + d_3 \Delta V_{pcc}
 \end{cases} \quad (6)$$

式中 $c_1 \sim c_3$, $d_1 \sim d_3$, $f_1 \sim f_3$ 的表达式见附录 A 部分。

1.4 单逆变器并网的小信号框图

用框图表示式(6)所代表的鲁棒下垂控制 VSG 并网小信号模型, 并进行整理, 为:

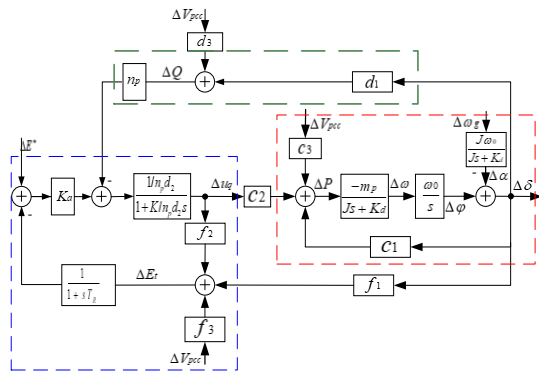


图 4 鲁棒下垂 VSG 并网小信号框图

Fig4 Small signal block diagram of single robust droop VSG inverter connected with system

2 SG 单机无穷大系统小信号模型

限于篇幅, 依据文献[17], 这里直接给出包含励磁机和自动调压器 (AVR: Automatic Voltage Regulator) 的 SG 单机无穷大系统的小信号框图。如图 5 所示:

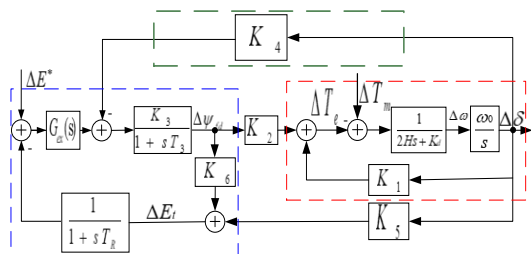


图 5 带励磁和 AVR 的 SG 小信号框图

Fig5 Small signal block diagram of SG with exciter & AVR

图 5 中, $K_1 \sim K_6$ 的意义及表达式可见[17]。

3 鲁棒下垂 VSG 与 SG 小信号模型比较

比较图 4 和图 5, 可知从小信号的角度, 鲁棒下垂控制 VSG 和 SG 具有完全一致的控制结构。因此, 如果微电网逆变器采用鲁棒下垂控制器的话, 那么在进行小信号稳定性建模的时候, 该逆变器和传统的 SG 兼容。相关概念、方法甚至分析软件, 也有可能直接套用于微电网场景中。但是, 逆变器和 SG 的工作原理不同。这导致二者虽然在控制结构上形似, 但区别也是明显的。总结起来如下:

1) 从小信号框图上可以看出, 本文所提出的鲁棒下垂 VSG 模拟了 SG 中的电枢反应 (绿色虚线框)、SG 转子运动方程和功角 (红色虚线框)、励磁支路和 AVR 控制 (蓝色虚线框), 实现了对 SG 内全部物理过程完整地模拟。

2) 如果要做到和 SG 具有一致的控制结构, VSG 的控制策略应该和本文所提的一致。经典下垂控制^[6], 没有考虑端电压幅值 E_t , 也没有引入积分器, 因此小信号模型和 SG 是不同的。

3) 关于电枢反应: SG 中 K_4 代表的是转子位置角的变化对励磁磁链的影响, 是为 SG 的电枢反应。 K_4 取值一般为正, 但在某些情况下也可能为负。负的 K_4 , 会给 SG 中引入负的阻尼转矩, 不利于系统的稳定性。在鲁棒下垂 VSG 中, $n_p d_1$ 项可以视作虚拟的电枢反应。在物理上, 它对应着功角变化对输出无功功率的影响。

4) 关于转子运动方程阻尼系数 K_d : SG 中 K_d 有两种取法。一种是表示转子运动摩擦系数, 一般小于 5%; 另一种代表转子转速变化过程中阻尼绕组提供的电磁转矩, 一般会比较大。逆变器中无实际的转子运动, 同时考虑到 K_d 取值较大有利于系统稳定, 故可以取较大 K_d , 而无需顾忌物理约束。

关于励磁支路和 AVR 控制: SG 中存在实际的励磁支路和 AVR 控制器。其参数取值, 由物理规律决定。一旦确定之后, 就可能是常数, 如 T_3 和 K_3 。而在 VSG 中, 虚拟的励磁支路参数取值由系统状态决定。部分参数可以人为

设定, 如 K_a 。大的 K_a 一般有利于系统稳定和电压控制的快速动态响应。在 SG 中, K_a 受放大电路器件和允许通过电流的约束, 是受限的。

4 算例

这里给出一个算例, 说明鲁棒下垂 VSG 和 SG 形似而实质不同。为保证 VSG 和 SG 具有一致的初始状态, 令 VSG 中 LC 滤波器 L_f 、 R_a 对应 SG 的定子绕组的漏电抗和电阻, 并令 SG 电枢反应电抗 $L_{ad}=L_{aq}=0$ 。这种情况下, 两种发电设备接入同一电网, 稳态值相同。相关参数见附录 B。系统结构同图 1。当系统运行到 1.5s 时, 给 PCC 处电压增加-0.05pu 的扰动, 持续时间为 20ms, 获得的 VSG 和 SG 功率、频率、电压等状态变化波形如图 6 所示:

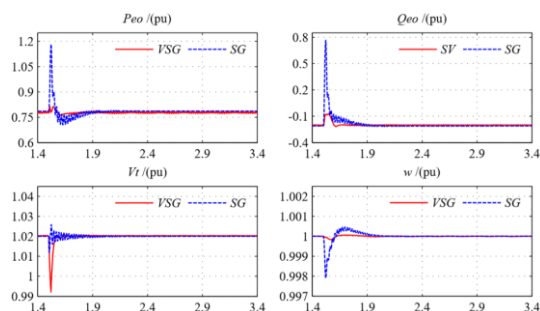


图 6 鲁棒下垂 VSG 和 SG 的动态响应曲线
Fig6 Dynamic response of robust droop VSG and SG

可见, 两种发电设备, 虽然初始状态相同, 在遭遇扰动后的动态过程也是不同的。SG 状态波动更大、且衰减更慢。

5 结论

本文主要做了鲁棒下垂控制 VSG 小信号建模及其与 SG 小信号模型比较研究。采用本文所提出的鲁棒下垂 VSG 控制器, 可以在小信号上面做到与 SG 的完全等效。能够完全模拟 SG 小扰动过程中全部的物理过程。这种控制策略有助于包含该型逆变器与 SG 的系统小信号建模。但由于逆变器和 SG 工作原理不同, 因此两种小信号模型只是形似而实质并不相同。

本文的分析结果对逆变器控制策略的比较、小信号稳定性机理的研究具有一定的借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] Wang X, Guerrero JM, Blaabjerg F, et al. A Review of Power Electronics Based Microgrids[J]. Journal of Power Electronics, 2012, 12(1):181-192.
- [2] 刘杨华, 吴政球, 涂有庆等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.
- [3] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇等. 微网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-108.
- [4] 王成山, 李璇, 彭克. 分布式电源并网逆变器典型控制方法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2):12-20.
- [5] 曾正, 李辉, 冉立. 交流微电网逆变器控制策略述评[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 142-151.
- [6] Lasseter R H, Paigi P. Microgrid: A Conceptual Solution[C]. Power Electronics Specialists Conference. IEEE 35th Annual, 2004:4285 - 4290, Vol. 6
- [7] Zhong Q C. Robust Droop Controller for Accurate Proportional Load Sharing Among Inverters Operated in Parallel [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 60(4):1281-1290.
- [8] Qing-Chang Zhong, George Weiss. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267
- [9] D'Arco S, Suul J A. Equivalence of Virtual Synchronous Machines and Frequency-Droops for Converter-Based MicroGrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1):394-395.
- [10] Sakimoto K, Miura Y, Ise T. Stabilization of a Power System Including Inverter-Type Distributed Generators by a Virtual Synchronous Generator [J]. Electrical Engineering in Japan, 2014, 187(3):7-17.
- [11] Yong Chen, Ralf Hesse, Dirk Turschner, et al. Improving the grid power quality using virtual synchronous machines[C]. Proceedings of the 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Torremolinos, Spain, 2011.
- [12] Changhua Zhang*, Jinsong Meng, Xin Chen, Qingchang Zhong, Qi Huang. "An Improved Synchronverter Model and its Dynamic Behaviour Comparison with Synchronous Generator" [C], 2013 IET Renewable Power Generation Conference, Beijing, China, 9-11 Sep., 2013.
- [13] 陈昕, 张昌华, 黄琦. 引入功率微分项下垂控制的微电网小信号稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3):46-53.
- [14] Liu J, Miura Y, Ise T. Comparison of Dynamic Characteristics Between Virtual Synchronous Generator and Droop Control in Inverter-Based Distributed Generators [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(5):3600-3611.
- [15] D'Arco S, Suul J A. Equivalence of Virtual Synchronous Machines and Frequency-Droops for Converter-Based MicroGrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1):394-395.
- [16] Rasheduzzaman M, Mueller J A, Kimball J W. An Accurate Small-Signal Model of Inverter-Dominated Islanded Microgrids Using dq Reference Frame [J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power

Electronics, 2017, 2(4):1070-1080.

[17] Kundur, Prabha. Power system stability and control [M]. 中国电力出版社, 麦格劳-希尔教育出版集团, 2001

[18] 肖凡, 张昌华等. 逆变器潮流计算节点类型等效及鲁棒下垂节点的潮流计算 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10):75-81.

基金项目

第 50 批教育部留学回国人员科研启动基金; 中央高校基本业务费项目(ZYGX2015J104); 国家自然科学基金(51677020).

作者简介:

张昌华 (1975-), 男, 通信作者, 工学博士, 副教授, 主要从事微电网分析, 新能源并网技术, 检测技术及自动化装置等方面的研

究工作. E-mail: zhangchanghua@uestc.edu.cn;

刘 倪 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 微电网稳定性分析和逆变器控制. E-mail: 1092734906@qq.com.;

陈昕 (1988-), 男, 讲师, 研究方向为智能电网、逆变器控制技术. E-mail: ainks517@163.com;

叶圣永 (1974-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划、电力系统稳定与控制. E-mail: yeshengyong410@126.com;

陈树恒 (1974-), 男, 工学博士, 副教授. 主要研究方向为现代配电网分析、运行及规划, 智能变电站技术和电力系统广域测量与控制。

刘群英(1977-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统分析。

附录

在附录中, 矩阵凡下标带 0 的值表示为初始状态的值。

A 单逆变器并网系统的小信号模型参数表达式

$$c_1 = \frac{V_{pcc0}(-R_T \cos \delta_0 + X_T \sin \delta_0)}{D} [-i_{d0} R_a + e_{d0} - i_{q0} L_f] + \frac{E_{B0}(R_T \sin \delta_0 + X_T \cos \delta_0)}{D} [i_{d0} L_f - i_{q0} R_a + e_{q0}],$$

$$c_2 = \frac{X_T}{D} [-i_{d0} R_a + e_{d0} - i_{q0} L_f] + \frac{R_T}{D} [i_{d0} L_f - i_{q0} R_a + e_{q0}] + i_{q0},$$

$$c_3 = \frac{-X_T \cos \delta_0 - R_T \sin \delta_0}{D} [-i_{d0} R_a + e_{d0} - i_{q0} L_f] + \frac{-R_T \cos \delta_0 + X_T \sin \delta_0}{D} [i_{d0} L_f - i_{q0} R_a + e_{q0}]$$

$$d_1 = \frac{V_{pcc0}(-R_T \cos \delta_0 + X_T \sin \delta_0)}{D} [i_{q0} R_a - i_{d0} L_f + e_{q0}] + \frac{V_{pcc0}(R_T \sin \delta_0 + X_T \cos \delta_0)}{D} [-i_{q0} L_f - i_{d0} R_a - e_{d0}],$$

$$d_2 = \frac{X_T}{D} [i_{q0} R_a - i_{d0} L_f + e_{q0}] + \frac{R_T}{D} [-i_{q0} L_f - i_{d0} R_a - e_{d0}] + i_{d0},$$

$$d_3 = \frac{X_{Tq} \cos \delta_0 + R_T \sin \delta_0}{D} [-i_{q0} R_a + i_{d0} L_f - e_{q0}] + \frac{R_T \cos \delta_0 - X_{Td} \sin \delta_0}{D} [i_{q0} L_f + i_{d0} R_a + e_{d0}],$$

$$f_1 = \frac{e_{d0}}{E_{r0}} \left[-\frac{V_{pcc0}(-R_T \cos \delta_0 + X_T \sin \delta_0)}{D} R_a + \frac{V_{pcc0}(R_T \sin \delta_0 + X_T \cos \delta_0)}{D} L_f \right] + \frac{e_{q0}}{E_{r0}} \left[-\frac{V_{pcc0}(R_T \sin \delta_0 + X_T \cos \delta_0)}{D} R_a - \frac{V_{pcc0}(-R_T \cos \delta_0 + X_T \sin \delta_0)}{D} L_f \right],$$

$$f_2 = \frac{e_{d0}}{E_{r0}} \left[-\frac{X_T}{D} R_a + \frac{R_T}{D} L_f \right] + \frac{e_{q0}}{E_{r0}} \left[-\frac{R_T}{D} R_a - \frac{X_T}{D} L_f + 1 \right],$$

$$f_3 = \frac{e_{d0}}{E_{r0}} \left[-\frac{-X_T \cos \delta_0 - R_T \sin \delta_0}{D} R_a + \frac{-R_T \cos \delta_0 + X_T \sin \delta_0}{D} L_f \right] + \frac{e_{q0}}{E_{r0}} \left[-\frac{-R_T \cos \delta_0 + X_T \sin \delta_0}{D} R_a - \frac{-X_T \cos \delta_0 - R_T \sin \delta_0}{D} L_f \right]$$

式中:

$$R_T = R_a + R_E \quad L_T = L_f + L_E \quad D = R_T^2 + L_T^2$$

B VSG 和 SG 并网系统中，系统仿真参数

表 B1 VSG 并网系统参数

Table B1 System simulation parameters in VSG grid-connected system

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
$P(\text{kW})$	50	J	5.0s	$U_{dc}(\text{kV})$	0.7	K_d	1
$R_a(\Omega)$	0.01	K	1	$L_f(\text{mH})$	2.8	K_a	200
$R_E(\Omega/\text{km})$	0.460	$P^*(\text{pu})$	0.8	$L_E(\text{mH}/\text{km})$	1.01	$Q^*(\text{pu})$	0
$C_f(\mu\text{F})$	13	$E^*(\text{pu})$	1.00	$\omega_0(\text{rad/s})$	314.15	$\omega^*(\text{pu})$	1
m	0.01	LineLength(km)	0.2	n	0.1		

表 B2 SG 并网系统参数

Table B2 System parameters of SG

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
$P(\text{kW})$	50	H	2.5s	L_{ad}	0	K_d	1
$R_s(\Omega)$	0.01	$L_\sigma(\text{mH})$	2.8	L_{aq}	0	GEX	200
R_f	0.05	L_f	0.2	T_R	0.02		

表 B3 系统初始状态

Table B3 System initial states

VSG 运行状态				SG 运行状态			
参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
$P_0(\text{pu})$	0.7784	$Q_0(\text{pu})$	-0.2000	$P_0(\text{pu})$	0.7861	$Q_0(\text{pu})$	-0.2000
$i_{a0}(\text{pu})$	-0.0110	$i_{q0}(\text{pu})$	0.7878	$i_{a0}(\text{pu})$	-0.0068	$i_{q0}(\text{pu})$	0.7952
$e_{a0}(\text{pu})$	0.2400	$e_{q0}(\text{pu})$	0.9914	$e_{a0}(\text{pu})$	0.2430	$e_{q0}(\text{pu})$	0.9906
$E_{i0}(\text{pu})$	1.02	$\omega_g(\text{pu})$	1.0	$E_{i0}(\text{pu})$	1.02	$\omega_g(\text{pu})$	1.0