

DOI: 10.7667/PSPC201812

弱电网条件下并网逆变器的锁相环静态稳定分析

欧阳逸风, 邹宇

(南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211153)

摘要: 在新能源发电经由逆变器接入电网的系统中, 并网逆变器的稳定性将随着接入点短路比的减小而降低。目前, 学术界针对这一问题已有较多研究, 但大多是基于状态空间模型线性化后利用相关控制理论进行分析, 缺乏直观的机理分析。采用忽略了电流内环响应时间的准稳态模型, 重点对并网逆变器中锁相环的静态稳定性进行分析, 得出了与传统单机无穷大系统中类似的静态稳定判据。由此稳定判据能直观得出并网逆变器维持同步前提下的输出功率极限, 并指出当并网逆变器超出此功率极限时将以过电压的形式失去稳定。采用并网逆变器的详细模型进行仿真分析, 验证了所提静态稳定判据的正确性。

关键词: 弱电网; 并网逆变器; 锁相环; 静态稳定; 功率极限

Static stability analysis of phase-locked loop in grid-connected inverters under weak grid condition

OUYANG Yifeng, ZOU Yu

(Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, China)

Abstract: In the system of renewable energy generation connecting to the power grid through an inverter, the stability of the grid-connected inverter will decrease as the short-circuit ratio of interconnection point decreases. At present, academics have done a lot of researches about this issue. However, most of them are based on the linearized state-space model and analyzed with related control theories which have a lack of mechanism analysis. This paper uses a quasi-steady state model that ignores the response time of the current loop, and studies the static stability of phase-locked loop in the grid-connected inverter. A static stability criterion similar to the traditional one-machine infinite bus system is obtained, which can intuitively draw the power limit of grid-connected inverter under the constraint of synchronization. It is pointed out that when the grid inverter exceeds this power limit, it will lose stability in the form of overvoltage. The simulation analysis is carried out with the detailed model of the grid-connected inverter to verify the correctness of the proposed static stability criterion.

This work is supported by Jiangsu Science and Technology Department (No. BZ2015010).

Key words: weak grid; grid-connected inverter; phase-locked loop; static stability; power limit

0 引言

近年来, 在国家政策的大力支持下, 新能源发电规模得到了迅猛发展, 但随之而来在工程中出现了不少新能源并网发电引发的稳定性问题^[1-6]。对此, 学术界展开了广泛而深入的研究, 大致得出了并网逆变器的稳定性随着接入点系统短路比的减少而降低的结论^[7-12], 工程规范中也给出了新能源发电系统并网点处的短路比需大于 10 的具体要求^[13]。但是并网逆变器稳定问题的深层机理尚未完全发掘。

对于并网逆变器的稳定问题已有较多研究, 但大多是基于详细的状态空间模型, 利用相关控制理论进行分析。文献[14]对两个光伏发电单元并联系统建立了小信号模型, 分析了电网强度、各光伏发电单元运行工况以及各逆变器锁相环控制器参数对系统稳定性的影响。文献[15]对单逆变器并网系统进行线性化处理, 使用根轨迹法分析锁相环、电流控制器、系统运行点、电网电抗和滤波电抗等多个因素对系统稳定性的影响, 得出了通过调整并网逆变器控制参数来抑制振荡的方法。文献[16]对单相 LCL 型并网逆变器建立了锁相环的小信号模型, 并推导了并网逆变器的稳定判据, 给出一种基于相角

裕度要求的锁相环参数设计方法。文献[17]采用谐波线性化方法推导了锁相环前后并网逆变器的正负序输出阻抗模型, 采用基于阻抗的分析方法研究了不同电网阻抗条件下锁相环对并网系统稳定性的影响。此类研究能详细考虑并网逆变器的各个控制环节, 对系统稳定性给出准确判断, 为控制参数设计提供指导。但是由于此类分析方法建模复杂, 分析结果往往不具有直观的物理意义, 因而无法探究更为深入的稳定机理。

为了研究逆变器并网系统的稳定机理, 往往需要专注于其中的某个环节, 尽量将其他环节等效简化, 从而由简洁的物理模型得出直观的稳定判据。文献[18]专注于逆变器的输出阻抗与电网等效阻抗的交互影响, 建立的阻抗分析模型, 得出了简洁的阻抗稳定判据。文献[19]将锁相环等控制环节引入阻抗模型之中, 得出了广义阻抗稳定判据。文献[20]专注于锁相环的稳定问题, 建立了分析锁相环稳定性的准稳态模型, 并从是否存在稳态解的角度给出了系统稳定的必要条件, 由于该文忽略了稳态解的合理性与稳定性, 因而给出的稳定条件偏于宽泛。

本文是在文献[20]的基础上做出的更深入的研究。在不考虑功率外环、忽略电流内环动态过程的前提下, 建立了分析锁相环静态稳定的准稳态模型, 基于该模型稳态解的稳定性与合理性得出了锁相回路的静态稳定判据, 并用向量图做出了直观解释。通过并网逆变器详细模型的仿真验证了该稳定判据。

1 锁相环准稳态模型

单个逆变器并网的等效模型如图1所示, 其中并网逆变器主要包含三个反馈控制环节: 电流内环控制、锁相环、功率外环控制。大电网采用电压源串联等值阻抗模型。本地负荷采用恒阻抗模型。

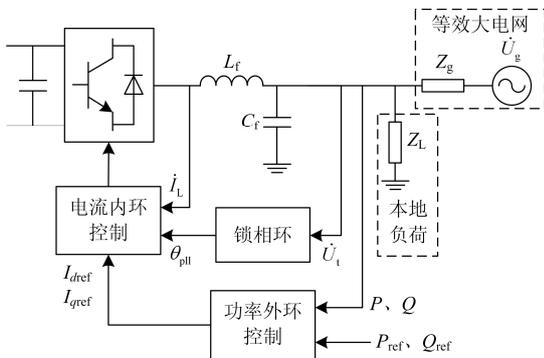


图1 单个逆变器并网等效模型框图

Fig. 1 Block diagram of the equivalent model of grid-connected system with a single inverter

为了专注于分析锁相环的稳定问题, 需要在锁相环的响应时间尺度内, 将并网逆变器的其他控制环节尽量简化。对于功率外环控制, 由于其时间常数较大, 可以认为其输出在锁相环的动态过程中保持不变。对于电流内环控制, 工程设计中通常将其响应时间控制在20 ms左右, 该响应时间可以近似忽略。因此, 并网逆变器在锁相环的响应时间尺度内可以简化为一个幅值不变、相角等于锁相环输出相角减功率因数角的电流源。由此得到锁相环控制回路的准稳态模型如图2所示。

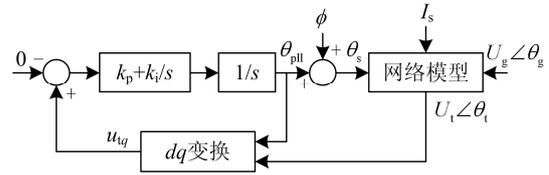


图2 锁相环控制回路准稳态模型框图

Fig. 2 Block diagram of quasi-steady state model of phase-locked loop

图中, θ_{pll} 为锁相环输出相角, ϕ 为参考功率的功率因数角, I_s 和 θ_s 分别为逆变器等效电流源的幅值和相角, U_g 和 θ_g 分别为大电网等效电压源的幅值和相角, U_t 和 θ_t 分别为并网点电压的幅值和相角, u_{tq} 为并网点电压的 q 轴分量。

在图2所示的准稳态模型中存在网络模型和 dq 变换两个无时滞的非线性环节, 下面对这两个非线性环节进行分析以求得 u_{tq} 与 θ_{pll} 的关系式。

网络模型如图3所示。由电路的叠加定理可以得到式(1)所示的 $U_t \angle \theta_t$ 的表达式。

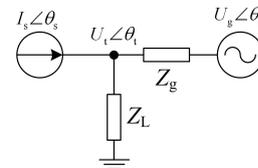


图3 逆变器并网系统简化模型

Fig. 3 Simplified model of grid-connected inverter system

$$U_t \angle \theta_t = \frac{Z_L Z_g}{Z_L + Z_g} I_s \angle (\theta_{pll} + \phi) + \frac{Z_L}{Z_L + Z_g} U_g \angle \theta_g \quad (1)$$

对于 dq 变换的过程, u_{tq} 即为 $U_t \angle \theta_t$ 在 d 轴角度为 θ_{pll} 的 dq 坐标系中 q 轴的投影, 因此

$$u_{tq} = U_t \sin(\theta_t - \theta_{pll}) =$$

$$\left| \frac{Z_L}{Z_L + Z_g} \right| \left[\left| Z_g \right| I_s \sin(\varphi_{ZU} + \varphi_{Zg} + \phi) + U_g \sin(\varphi_{ZU} + \theta_g - \theta_{pll}) \right] \quad (2)$$

式中

$$\varphi_{ZU} = \angle \left(\frac{Z_L}{Z_L + Z_g} \right), \varphi_{Zg} = \angle Z_g \quad (3)$$

2 锁相环稳定判据与功率极限

2.1 锁相环静态稳定判据

对于图 2 所示的锁相环控制回路，其稳定的基本前提是其中的非线性环节构成负反馈，即

$$du_{tq} / d\theta_{pll} < 0 \quad (4)$$

$$\left| \frac{Z_L}{Z_L + Z_g} \right| U_g \cos(\varphi_{ZU} + \theta_g - \theta_{pll}) > 0 \quad (5)$$

$$-90^\circ < \varphi_{ZU} + \theta_g - \theta_{pll} < 90^\circ \quad (6)$$

由于 φ_{ZU} 不够直观，考虑将其做替换。利用稳态时有 $u_{tq}=0$ ，即 $\theta_t = \theta_{pll}$ ，再结合式(1)可得

$$\theta_{pll} = \varphi_{ZU} + \theta_{t0} \quad (7)$$

式中：

$$\theta_{t0} = \angle (Z_g \dot{I}_s + \dot{U}_g) \quad (8)$$

因此，锁相环的静态稳定判据可以简洁地描述为

$$-90^\circ < \theta_g - \theta_{t0} < 90^\circ \quad (9)$$

定义辅助电压相量为

$$\dot{U}_{t0} = Z_g \dot{I}_s + \dot{U}_g \quad (10)$$

式(9)的物理意义即为，电压相量 \dot{U}_{t0} 与 \dot{U}_g 的夹角需小于 90° 。

2.2 锁相环静态稳定判据的直观阐释

式(9)所示的稳定判据可以在相量图上做更直观的阐释。首先，锁相环跟踪端口电压相角的过程可以直观理解为端口电压相量对 d 轴相量有“吸引”作用。然后便只需要看这种“吸引”作用能否让系统在平衡点处稳定。

假定系统平衡时， \dot{U}_{t0} 与 \dot{U}_g 夹角小于 90° ，根据式(10)画出相量图如图 4 所示。从图中做简单的几何分析即可得到，当锁相环输出的 d 轴相角出现扰动 $\Delta\theta_{pll}$ 时，电流源 \dot{I}_s 的相角也将变化 $\Delta\theta_{pll}$ ，进而影响到端口电压的相角变化为 $\Delta\theta_t$ 。在这种情况下显然 $\Delta\theta_t < \Delta\theta_{pll}$ ，因此在端口电压相量的“吸引”作用下，锁相环输出相角将回到平衡点。此平衡点为稳定平衡点。

假定系统平衡时， \dot{U}_{t0} 与 \dot{U}_g 夹角大于 90° ，根据式(10)画出相量图如图 5 所示。同理，当锁相环输出的 d 轴相角出现扰动 $\Delta\theta_{pll}$ 时，端口电压的相角

将变化 $\Delta\theta_t$ 。在这种情况下显然有 $\Delta\theta_t > \Delta\theta_{pll}$ ，因此在端口电压相量的“吸引”作用下，锁相环输出相角将更加远离平衡点。此平衡点为不稳定平衡点。

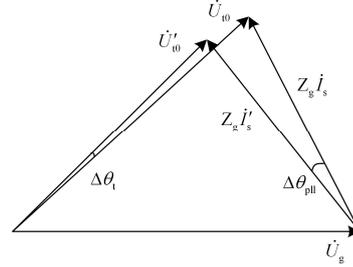


图 4 锁相环静态稳定时的相量图

Fig. 4 Phasor diagram of phase-locked loop in static stable state

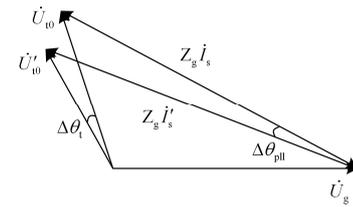


图 5 锁相环静态不稳定时的相量图

Fig. 5 Phasor diagram of phase-locked loop in static unstable state

2.3 锁相环静态稳定条件下的功率极限

由 2.2 节的分析可以得出，锁相环静态稳定的临界条件是 \dot{U}_{t0} 与 \dot{U}_g 夹角等于 90° 。因此，假定 $\theta_g=0$ ，从相量图上可以直观得出以下结论：

1) 当相量 $Z_g \dot{I}_s$ 的角度在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 内时，锁相环静态稳定前提下的功率极限为无穷大。

2) 当相量 $Z_g \dot{I}_s$ 的角度在区间 $[-180^\circ, -90^\circ] \cup [90^\circ, 180^\circ]$ 内时，锁相环静态稳定条件下的功率极限为

$$P_{\max} = \frac{U_g U_g}{-|Z_g| \cos(\theta_t + \phi + \varphi_{Zg})} \quad (11)$$

从式(11)中可以看出，逆变器的功率极限与电网等值阻抗的幅值呈反比，这与大部分文献得出的定性结论一致，即电网越弱，逆变器功率极限越低，系统越不稳定。

此外，式(11)还表明逆变器的功率极限与 θ_t 、 ϕ 、 φ_{Zg} 有着复杂的关系。 θ_t 与电网联络线上交换功率的大小方向有关， ϕ 与逆变器输出有功、无功的方向有关。通常在 $\varphi_{Zg} \approx 90^\circ$ 的情况下，逆变器从电网吸收功率时的功率极限比向电网送出功率时要高，逆变器在输出有功的情况下发出感性无功能提高功率极限，逆变器在吸收有功的情况下发出容性无功能提高功率极限。

3 锁相环静态失稳的具体表现形式

从图 5 的分析可以知道, 当 \dot{U}_{i0} 与 \dot{U}_g 夹角大于 90° 时, 锁相环将形成正反馈而失去稳定。但是, 锁相环静态失稳的具体表现形式并不是频率失稳, 而是电压失稳。因为, 在逆变器输出功率和功率因数角不变的情况下, 存在两个如图 6 所示的锁相环静态平衡点, 它们关于相量 \dot{U}_g 的垂直平分线对称, 一个为高电压平衡点, 一个为低电压平衡点。当期望系统运行在左侧的低电压不稳定平衡点时, 锁相环的正反馈作用将使系统转移到右侧的高电压稳定平衡点。具体到工程实际中则可能出现过电压现象, 触发一些过电压保护动作。

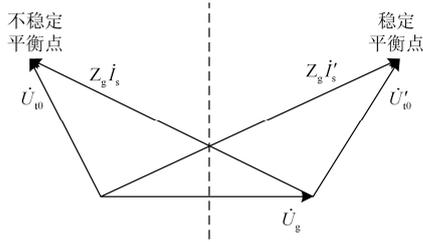


图 6 等功率下的两个锁相环静态平衡点

Fig. 6 Two static equilibrium points of phase-locked loop in same power

4 仿真实验

4.1 仿真系统参数

以图 1 所示的逆变器并网系统做仿真实验。系统各环节参数如表 1 所示。

表 1 逆变器并网系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of grid-connected inverter system

参数名	参数值	参数名	参数值
U_g	380 V	θ_g	0°
$ Z_g $	0.5Ω	θ_{Z_g}	90°
L_f	1 mH	C_f	1 μF
锁相环比例系数	180	锁相环积分系数	3 200
电流内环比例系数	0.1	电流内环积分系数	0.005
功率外环比例系数	0.001	功率外环积分系数	0.05

4.2 场景 1

假定并网点与大电网之间交换功率为 0, 则 $\theta_i = \theta_g = 0$ 。同时, 令逆变器输出有功功率, 输出功率因数为 1, 则 $\phi = 0$ 。因此相量 $Z_g \dot{I}_s$ 的角度为 90° , \dot{U}_{i0} 的角度永远小于 90° 。由 2.3 节的结论可知, 此时逆变器的输出功率极限为无穷大。仿真通过同步增加逆变器输出有功和本地负荷 Z_L 的有功进行验证, 即逆变器输出有功全部在本地消纳。在 8 s 内, 令逆

变器输出有功从 200 kW 增加到了 900 kW, 逆变器有功增长曲线如图 7 所示, 并网点处的电压、频率曲线如图 8 和图 9 所示。从中可以看出, 系统始终能维持稳定。

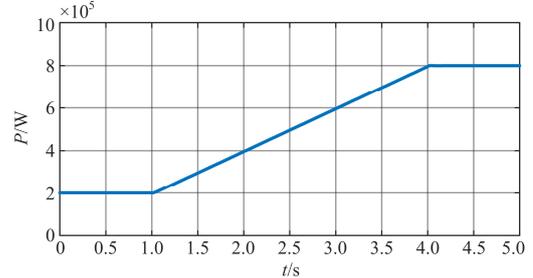


图 7 逆变器输出有功功率变化曲线

Fig. 7 Active power change curve of inverter

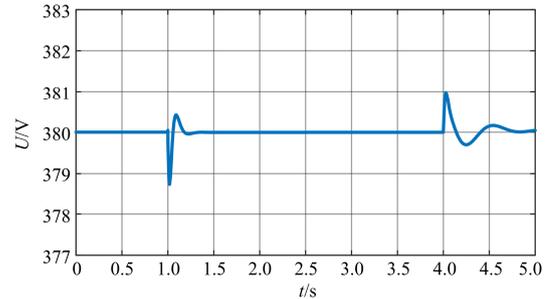


图 8 并网点电压变化曲线

Fig. 8 Voltage change curve of point of interconnection

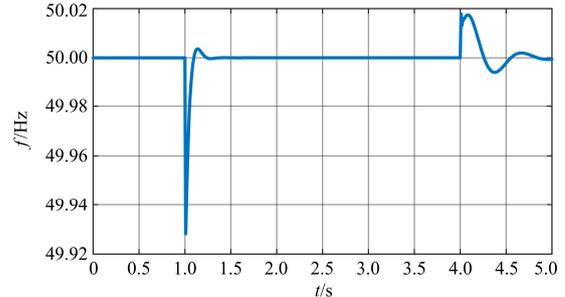


图 9 并网点频率变化曲线

Fig. 9 Frequency change curve of point of interconnection

4.3 场景 2

假定并网点电压超前大电网电压 30° , 幅值与大电网电压相等, 即此时并网逆变器向大电网输送有功功率为

$$P_{\text{grid}} = \frac{380 \text{ V} \times 380 \text{ V}}{0.5 \Omega} \sin 30^\circ = 144.4 \text{ kW} \quad (12)$$

为维持并网点电压, 本地需要提供的无功补偿为

$$Q_{\text{LC}} = \frac{380 \text{ V} \times 380 \text{ V}}{0.5 \Omega} (1 - \cos 30^\circ) = 38.7 \text{ kvar} \quad (13)$$

将该部分无功补偿加入到本地负荷之中。

令逆变器功率因数角 $\phi = 0$ ，则相量 $Z_g \dot{i}_s$ 的角度为 120° ，由 2.3 节的结论可知，此时逆变器在锁相环静态稳定前提下的输出功率极限为

$$P_{\max} = \frac{380 \text{ V} \times 380 \text{ V}}{-0.5 \Omega \times \cos 120^\circ} = 333.49 \text{ kW} \quad (14)$$

再假定逆变器的输出有功为 350 kW(超出功率极限)，则本地负荷有功为 $350 - 144.4 = 205.6 \text{ kW}$ 。

以上述逆变器超出锁相环静态稳定功率极限的潮流(逆变器输出有功功率为 350 kW，输出无功为 0；本地负荷吸收有功功率为 205.6 kW，输出无功功率为 38.7 kVar)作为时域仿真的初始状态，在不施加任何扰动的前提下，仿真得到的逆变器输出功率曲线如图 10 所示，并网点电压、频率曲线如图 11 和图 12 所示。从仿真结果中可以看出，系统的初始

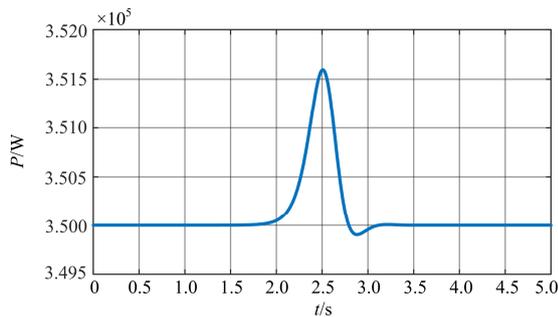


图 10 逆变器输出有功功率变化曲线

Fig. 10 Active power change curve of inverter

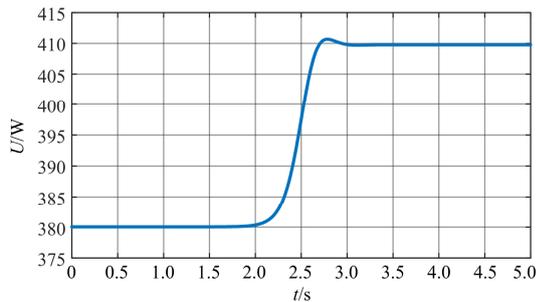


图 11 并网点电压变化曲线

Fig. 11 Voltage change curve of point of interconnection

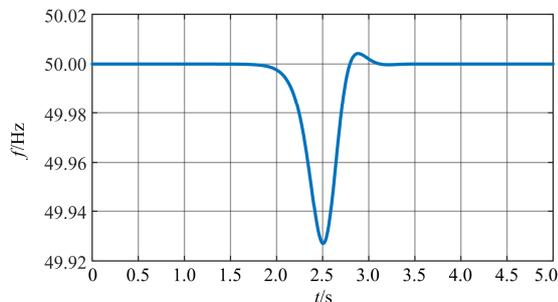


图 12 并网点频率变化曲线

Fig. 12 Frequency change curve of point of interconnection

潮流状态会自发地失稳，并过渡到一个电压更高的稳定运行点。因此，上述逆变器超出输出功率极限的潮流为不稳定运行点，这与第 3 节的描述一致，从而验证了本文所提稳定判据的有效性。

5 结论

本文采用准稳态模型对并网逆变器中锁相环的静态稳定性进行分析，得出了锁相环的静态稳定判据，并由此判据得出了并网逆变器的输出功率极限。通过对并网逆变器详细模型进行仿真分析可以得出以下结论：

1) 锁相环静态稳定的判据为辅助电压相量 \dot{U}_{10} 与大电网等效电压源 \dot{U}_g 的夹角小于 90° 。

2) 当并网逆变器等效电流源确定的相量 $Z_g \dot{i}_s$ 与大电网等效电压源 \dot{U}_g 的夹角小于 90° 时，锁相环静态稳定前提下的逆变器功率极限为无穷大；当该夹角大于 90° 时，存在式(11)所示的逆变器功率极限。

3) 当逆变器输出功率超出锁相环静态稳定的功率极限时，系统将以过电压的形式失去稳定。

参考文献

- [1] 王旭斌, 杜文娟, 王海风. 弱连接条件下并网 VSC 系统稳定性分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1593-1604.
WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Stability analysis of grid-tied VSC systems under weak connection conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1593-1604.
- [2] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.
TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R & D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771.
- [3] 马进, 赵大伟, 钱敏慧, 等. 大规模新能源接入弱同步支撑直流送端电网的运行控制技术综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3112-3120.
MA Jin, ZHAO Dawei, QIAN Minhui, et al. Review of control technologies of large-scale renewable energy connected to weakly-synchronized sending-end DC power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3112-3120.
- [4] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2366-2372.
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016,

- 36(9): 2366-2372.
- [5] 栗然, 卢云, 刘会兰, 等. 双馈风电场经串补并网引起次同步振荡机理分析[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3073-3079.
LI Ran, LU Yun, LIU Huilan, et al. Mechanism analysis of subsynchronous oscillation caused by grid-integration of doubly fed wind power generation system via series compensation[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3073-3079.
- [6] QUINTERO J, VITTAL V, HEYDT G T, et al. The impact of increased penetration of converter control-based generators on power system modes of oscillation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2248-2256.
- [7] ZHOU J Z, DING H, FAN S, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2287-2296.
- [8] ZHAO M, YUAN X, HU J, et al. Voltage dynamics of current control time-scale in a VSC-connected weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2925-2937.
- [9] 张武其, 吕洋. 向弱电网供电的 VSC-HVDC 系统的模拟惯量控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 104-110.
ZHANG Wuqi, LÜ Yang. Emulation inertia control strategy for VSC-HVDC supplying weak network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 104-110.
- [10] 王磊, 张琛, 李征, 等. 双馈风电机组的虚拟同步控制及弱网运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 85-90.
WANG Lei, ZHANG Chen, LI Zheng, et al. Virtual synchronous generator control for DFIG wind turbines and its operation characteristics in weak grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 85-90.
- [11] 严干贵, 常青云, 黄亚峰, 等. 弱电网接入下多光伏逆变器并联运行特性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 933-940.
YAN Gangui, CHANG Qingyun, HUANG Yafeng, et al. Analysis on parallel operational characteristics of multi photovoltaic inverters connected to weak-structured power system[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 933-940.
- [12] 陈磊, 刘永奇, 戴远航, 等. 电力电子接口新能源并网的暂态电压稳定机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 15-21.
CHEN Lei, LIU Yongqi, DAI Yuanhang, et al. Study on the mechanism of transient voltage stability of new energy source with power electronic interface[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 15-21.
- [13] 中国电力科学研究院. 分布式电源接入电网技术规定: Q/GDW 480—2010[S]. 北京: 国家电网公司, 2010.
China Electric Power Research Institute. Technical rule for distributed resources connected to power grid: Q/GDW 480—2010[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2010.
- [14] 贾祺, 严干贵, 李泳霖, 等. 多光伏发电单元并联接入弱交流系统的稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 14-20.
JIA Qi, YAN Gangui, LI Yonglin, et al. Stability analysis of multiple paralleled photovoltaic power generation units connected to weak AC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 14-20.
- [15] 王晖, 李莹, 李文锋, 等. 并网逆变器复合电流环引起次/超同步振荡机理研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1061-1067.
WANG Hui, LI Ying, LI Wenfeng, et al. Mechanism research of subsynchronous and supersynchronous oscillations caused by compound current loop of grid-connected inverter[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1061-1067.
- [16] 吴恒, 阮新波, 杨东升. 弱电网条件下锁相环对 LCL 型并网逆变器稳定性的影响研究及锁相环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5259-5268.
WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng. Research on the stability caused by phase-locked loop for LCL-type grid-connected inverter in weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5259-5268.
- [17] 王赟程, 陈新, 张昉, 等. 三相并网逆变器锁相环频率特性分析及其稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3843-3853.
WANG Yuncheng, CHEN Xin, ZHANG Yang, et al. Frequency characteristics analysis and stability research of phase locked loop for three-phase grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3843-3853.
- [18] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [19] 辛焕海, 李子恒, 董炜, 等. 三相变流器并网系统的广义阻抗及稳定判据[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1277-1292.
XIN Huanhai, LI Ziheng, DONG Wei, et al. Generalized-impedance and stability criterion for grid-connected converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1277-1292.
- [20] DONG D, WEN B, BORROYEVICH D, et al. Analysis of phase-locked loop low-frequency stability in three-phase grid-connected power converters considering impedance interactions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 310-321.

收稿日期: 2018-01-12; 修回日期: 2018-05-14

作者简介:

欧阳逸风(1989—), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: yifeng-ouyang@sac-china.com

邹宇(1975—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制. E-mail: edward-yu.zou@sac-china.com

(编辑 张爱琴)