



信息能源系统的信物融合稳定性分析

王睿 孙秋野 张化光

Stability Analysis of Cyber-physical Fusion in Cyber-energy Systems

WANG Rui, SUN Qiu-Ye, ZHANG Hua-Guang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16383/j.aas.c210480>

您可能感兴趣的其他文章

假数据注入攻击下信息物理融合系统的稳定性研究

On the Stability of Cyber-physical Systems Under False Data Injection Attacks

自动化学报. 2019, 45(1): 196-205 <https://doi.org/10.16383/j.aas.2018.c180331>

考虑鸣笛效应和驾驶员异质性的新格子模型稳定性分析

Stability Analysis of Lattice Model Considering the Honk Effect and Driver Heterogeneity

自动化学报. 2020, 46(8): 1738-1747 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c180137>

信息物理融合的智慧能源系统多级对等协同优化

Multilevel Peer-to-Peer Co-optimization for Cyber-physical Intelligent Energy Systems

自动化学报. 2019, 45(1): 84-97 <https://doi.org/10.16383/j.aas.2018.c180368>

比特驱动的瓦特变革—信息能源系统研究综述

Bit-driven Watt Revolution—A Review of Cyber Energy System

自动化学报. 2021, 47(1): 50-63 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c200634>

走向社会信息物理生产系统

Towards Social Cyber-physical Production Systems

自动化学报. 2019, 45(4): 637-656 <https://doi.org/10.16383/j.aas.2018.c180274>

信息物理系统技术综述

Survey on Cyber-physical Systems

自动化学报. 2019, 45(1): 37-50 <https://doi.org/10.16383/j.aas.2018.c180362>

信息能源系统的信-物融合稳定性分析

王睿¹ 孙秋野^{1,2} 张化光^{1,2}

摘要 尽管信息物理系统的稳定性已经得到了广泛的研究,但大部分的学者皆关注于通信网络延时或攻击下的信息物理系统的稳定性问题,无网络通信的信息物理系统的信物融合稳定性分析策略亟待提出.其中,内嵌数字控制系统的并网逆变器系统是一种最简单、最典型的信息能源系统.同时,从效率的角度出发,逆变器的开关/采样频率总是选择尽可能低的频率,其势必产生系统固有延迟时间(控制理论中称为时间延迟).这种延迟时间往往容易引起系统的低频/次同步振荡,弱电网将加剧此现象.为此,提出一种信息能源系统的信-物融合稳定性分析技术.首先,基于帕德近似方法,建立了具有等效延迟时间的信息物理系统阻抗模型.该等效延迟时间由三部分组成,即信息/物理层的采样延迟时间、信息层的计算延迟时间和物理层的脉宽调制延迟时间,其有效地反映了信息-物理相互融合作用的影响.进而设计了稳定禁止区域判据,利用空间映射使开关/采样频率求解过程转化为 Hurwitz 矩阵辨识问题.在这些空间映射的基础上,最小开关/采样频率通过自适应步长搜索算法获得.最后,仿真和实验结果验证了该方法的有效性.

关键词 信息能源系统,稳定性分析,稳定禁止区域判据, Hurwitz 矩阵,自适应步长搜索算法

引用格式 王睿,孙秋野,张化光.信息能源系统的信-物融合稳定性分析.自动化学报,2023,49(2):307-316

DOI 10.16383/j.aas.c210480

Stability Analysis of Cyber-physical Fusion in Cyber-energy Systems

WANG Rui¹ SUN Qiu-Ye^{1,2} ZHANG Hua-Guang^{1,2}

Abstract Although the cyber-physical system stability has been widely studied, most scholars pay more attention on system stability with communication time delay or attack. It is urgent for numerous scholars to provide one guide regarding cyber-physical system without communication network. Therein, the system regarding grid-connected inverters with the digital control system is regarded as one simplest and typical cyber-physical energy system. Meanwhile, the switching/sampling frequency of the inverter is always selected as low as possible from an efficiency viewpoint, resulting in unavoidable delay time (time delay in control theory). This delay time is always apt to cause the system low frequency/sub-synchronous oscillation, which is more prone to severity under weak grid. To this end, this paper provides one stability-oriented analysis approach of cyber-physical fusion in cyber-energy systems, which is suitable for grid-connected inverters under weak grid. Firstly, the system impedance model with equivalent delay time is constructed, which is based on the Pade approximate approach. This equivalent delay time consists of three parts, i.e., sampling delay time in cyber/physical level, calculation delay time in cyber level and pulse-width modulation delay time in physical level, which reflects the cyber-physical interaction impact. Furthermore, the stability forbidden criterion is applied to make the switching/sampling frequency solving process become a Hurwitz matrix identification problem through space mappings. Based on these space mappings, the adaptive step collection algorithm is adopted to obtain the minimum switching/sampling frequency. Finally, the simulation and experiment results illustrate the effectiveness of the proposed approach.

Key words Cyber-physical energy systems, stability analysis, stability forbidden region criterion, Hurwitz matrix identification, adaptive step collection algorithm

Citation Wang Rui, Sun Qiu-Ye, Zhang Hua-Guang. Stability analysis of cyber-physical fusion in cyber-energy systems. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(2): 307-316

收稿日期 2021-06-01 录用日期 2021-10-18
Manuscript received June 1, 2021; accepted October 18, 2021
国家自然科学基金(U20A20190, 62073065), 国家重点研发计划(2018YFA0702200) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (U20A20190, 62073065), National Key Research and Development Program of China (2018YFA0702200)
本文责任编辑 诸兵
Recommended by Associate Editor ZHU Bing
1. 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819 2. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 110819
1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819 2. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819

近年来,随着互联网、云计算等信息科技的蓬勃发展,2006年美国国家科学基金会提出了信息技术的发展方向——信息物理系统(Cyber-physical system, CPS)^[1], CPS是计算资源和物理资源的紧密耦合与协同,使得系统的适应性、自治力、可靠

性、安全性和可用性远超当前的系统^[2]。能源是人类赖以生存和发展的基础,能源的可持续和清洁化始终是人类孜孜以求的目标^[3]。近年来,随着风、光等新能源利用技术的高速发展,以风、光等永续清洁能源为主要供能形式,建设清洁低碳安全高效的信息能源系统,实现绿色可再生能源高效利用,破解当前化石能源困局成为业界重要共识^[4]。尽管信息物理系统的稳定性已经得到了广泛的研究,但大部分的学者皆关注于通信网络延时或攻击下的信息物理系统的稳定性问题^[5-6],无网络通信的信息物理系统的信-物融合稳定性分析策略亟待提出。其中,内嵌数字控制系统的并网逆变器系统可以被认为是最简单和最典型的信息能源系统之一。基于此,本文聚焦于无通信网络的内嵌数字控制的并网逆变器系统,提出信息能源系统的信-物融合稳定性分析技术。

信息能源/信息电力系统稳定性已经被广泛研究,其可以被区分为网络攻击下的系统稳定性问题和无网络攻击下的系统稳定性问题^[7-11]。从攻击角度出发,当前研究已经从网络攻击^[7]、攻击级联反应^[8]、主动预防^[9]等多角度构建了相对完整的研究体系。从无攻击角度出发,当前研究多集中于分布式/集中式通信网络的延时。Xu 等^[10]和张一媚等^[11]分别对信息电力系统和信息能源系统信-物融合导致的通信延时设计了延时阈值条件。两者都是针对二级控制中存在的通信延时展开研究,给出了二级控制中致使控制器失效的极限延时时间。无通信网络的底层信息能源网络稳定性评估尚属空白,而隶属于无通信网络的底层信息能源网络的内嵌数字控制系统的并网逆变器系统可以被认为最简单而典型的信息物理系统之一,其包含数字控制系统和电力变换器件而无通信网络。从效率的角度出发,逆变器的开关/采样频率总是选择尽可能低的频率,其势必产生系统固有延迟时间^[12],此固有延时时间由信息/物理层的采样延迟时间、信息层的计算延迟时间和物理层的脉宽调制 (Pulse-width modulation, PWM) 延迟时间三部分组成,其有效反映了信息-物理相互融合作用的影响。因此,确保系统稳定情况下的信息-物理相互融合而导致的等效延时的阈值亟待提出,该阈值可以进一步指导实际微电网开关/采样频率的选取,避免系统出现信息-物理融合影响而导致的失稳现象。同时,在 2020年,功率-信号混合传递策略在 *Nature Communications* 上被提出,本文方法不需要传统的通信网络,而是通过物理层的脉宽调制的开关频率和相位偏差两个自由度传递信息,该方法将信息-物理耦合成了一个整体^[13]。然而该方法需要一系列正交的开关频率传递

信息,随着开关频率的降低也会导致信息-物理融合的低频/次同步振荡问题。

由采样-计算-脉宽调制造成的固有延时隶属于纳秒级延时,同时隶属于系统最底层且基础的电磁时间尺度的稳定性问题和电力系统中的静态小扰动稳定性问题^[14]。目前,电磁时间尺度稳定性分析技术已经取得了诸多研究成果^[15-23]。相关成果可以被分为基于状态方程的稳定性分析技术^[14-17]、基于闭环传递函数的稳定性分析技术^[18-19]和基于阻抗方法的稳定性分析技术^[20-26] 3 个大类。其中基于状态方程的稳定性分析技术首先从电能变换器件及其连接线路的角度出发构建整个系统的状态方程,其主要热点及难点问题在于构建整个状态方程时考虑延时、锁相环耦合等问题。文献 [14] 提出通过柏德近似等方法对上述问题进行化简。此外,当电力变换器的数量增多时,整体的状态方程将变得十分复杂,目前有效的解决方法是对整体的状态方程进行降阶,如奇异值摄动法^[15]、Schur 变换法^[16]和 Kron 降阶法^[17]等。基于闭环传递函数的稳定性分析方法是建立整个系统模型并利用波特图和根轨迹等方法判别系统的稳定性^[18]。然而基于闭环传递函数的波特图和根轨迹法也存在复杂的计算量,因此,该稳定性分析方法也需要降阶处理,其常见的降阶方法有奇异值摄动法等^[19]。然而,状态方程法和闭环传递函数法随着变换器数量增加而导致模型维数灾问题,并且随着可再生能源的渗透率不断地提高,整个网络的状态方程或传递函数难以构建^[20]。

因此,基于阻抗方法的电磁时间尺度稳定性分析技术越来越得到学者的关注。阻抗方法通过构建整个系统的阻抗模型并利用广义奈奎斯特曲线^[21]以判别系统稳定性。鉴于双向能流的交/直流混合微电网的急速发展,文献 [21] 首先提出了 Z + Z 型阻抗评估判据。鉴于现存广义奈奎斯特判据高复杂性,相关学者提出了简化稳定判据,如范数阻抗判据和禁止区域阻抗判据^[22-24]。其中,根据不同范数类别和判据区间范围,将基于范数的阻抗判据分为 G 范数判据、Infinity 范数判据和 Infinity-one 范数判据^[22] 3 类。另外一系列的稳定判据则基于禁止区域,如 Middlebrook 判据、增益和相位裕度判据、对立的观点判据等^[23-24]。然而上述阻抗稳定性分析方法多关注于稳定运行点的辨识和所构建的回比矩阵的稳定裕度,而无法提供确保系统稳定运行时,等效延时的变化区域或系统采样/开关频率阈值。为了提供在信息-物理融合影响的情况下确保系统稳定的采样/开关频率阈值,本文提出了一种基于自适应步长搜索算法的采样/开关频率阈值辨识技术。

本文的主要特点和优点如下:

1) 本文构建了内嵌等效时延的广义阻抗回比矩阵, 该等效延迟时间由信息/物理层的采样延迟时间、信息层的计算延迟时间和物理层的脉宽调制延迟时间 3 部分组成. 其有效反映了信息-物理相互融合的影响和为后续系统采样/开关频率阈值辨识提供模型基础.

2) 本文利用柏德逼近技术将延时的指数型函数转化为频率分数函数, 进而将系统采样/开关频率阈值的求解问题转化为等效回比矩阵为 Hurwitz 的辨识问题. 其消除了传统阻抗技术中所涉及的广义奈奎斯特判据复杂度高的问题, 进而可以获得工程可用的稳定性判据.

3) 本文提出了基于自适应步长搜索算法的采样/开关频率阈值辨识技术, 其能够获得信息能源系统采样/开关频率阈值, 有效指导微电网开关/采样频率的选取, 避免系统出现信息-物理融合影响而导致失稳现象.

1 广义阻抗回比矩阵

常见的内嵌数字控制系统的并网逆变器系统如图 1 所示^[23-27], 图 1 中, DG 代表分布式电源. 在弱电网当中, 相较于传统的 P&Q 控制型并网逆变器, 下垂控制型并网逆变器具备更好的系统稳定性. 基于此, 下垂控制型并网逆变器已经被广泛应用于当前的交流微电网当中^[22], 具体控制策略见文献 [23]. 在此类分散式控制系统当中, 信息物理网络间存在固有延时时间, 包括信息/物理层的采样延迟时间、信息层的计算延迟时间和物理层的脉宽调制延迟时间三部分组成, 其有效反映了信息-物理相互作用的影响^[24]. 在本文中, 由于此信息-物理相互作用而产生的等效延时定义为 $G(\tau)$. 从稳定性分析判据出发, 本文所研究的微电网系统可以等效为如图 2 所示的同步旋转坐标系下 (dq 轴) 的戴维南等效电路^[2]. 值得注意的是, 本文将多个分布式电源和逆变器系统等效为图 2 的单电源系统, 该等效是阻抗辨识技术相较于其他方法的最大优势, 通过网络拓扑等效可以降低计算负担, 本方法保留了精细划分不同电源/逆变器分别对系统稳定性的影响/贡献量, 可以利用参与因子法对某个或某几个电源/逆变器的影响进行精细化区分.

相关电源/负载阻抗可以通过如下过程获得: 在 dq 轴下, 下垂控制器的电压/电流动态特性如下所示^[27]:

$$V_{invd} = I_{invd}(R_{inv} + sL_{inv}) - \omega L_{inv} I_{invq} + V_{cd} \quad (1)$$

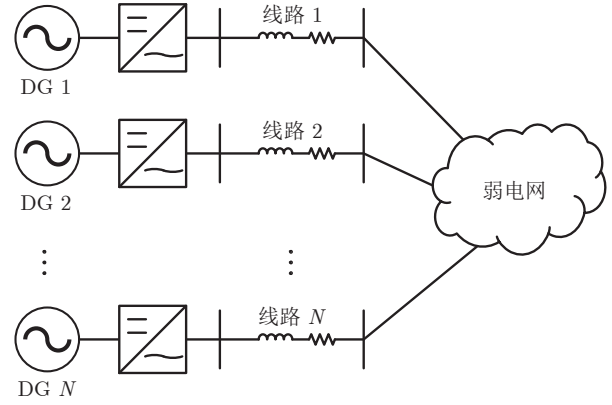


图 1 内嵌数字控制系统的并网逆变器

Fig.1 Grid connected inverter with digital control system

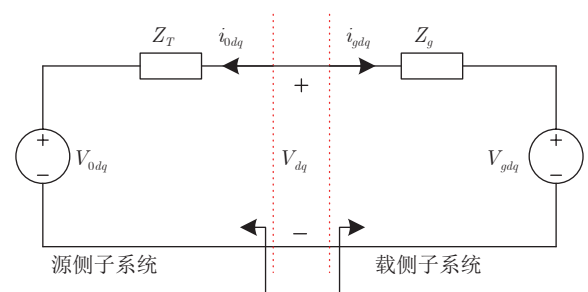


图 2 互联系统戴维南等效电路

Fig.2 Thevenin equivalent circuit of interconnected system

$$V_{invq} = I_{invq}(R_{inv} + sL_{inv}) + \omega L_{inv} I_{invd} + V_{cq} \quad (2)$$

$$I_{invd} = C_{inv} V_{cd} s - \omega C_{inv} V_{cq} + I_{cd} \quad (3)$$

$$I_{invq} = C_{inv} V_{cq} s + \omega C_{inv} V_{cd} + I_{cq} \quad (4)$$

式中, V_{invd} 、 V_{invq} 、 I_{invd} 和 I_{invq} 分别表示在 dq 轴下并网逆变器的输出电压和电流; V_{cd} 、 V_{cq} 、 I_{cd} 和 I_{cq} 分别表示在 dq 轴下并网逆变器的电压和电流; R_{inv} 、 L_{inv} 和 C_{inv} 分别表示电阻-电感-电容 (Resistance-inductance-capacitance, RLC) 电路中的电阻、电感和电容. 进一步, 电压-电流双闭环控制器如下所示^[27]:

$$I_{invd}^{\#} = G_v^{inv} (V_{cd}^{\#} - V_{cd}) - \omega C_{inv} V_{cq} + K I_{cd} \quad (5)$$

$$I_{invq}^{\#} = G_v^{inv} (V_{cq}^{\#} - V_{cq}) + \omega C_{inv} V_{cd} + K I_{cq} \quad (6)$$

$$V_{invd}^{\#} = G_i^{inv} (I_{cd}^{\#} - I_{cd}) - \omega L_{inv} I_{cq} + V_{cd} \quad (7)$$

$$V_{invq}^{\#} = G_i^{inv} (I_{cq}^{\#} - I_{cq}) + \omega L_{inv} I_{cd} + V_{cq} \quad (8)$$

式中, $I_{cd}^{\#}$ 、 $I_{cq}^{\#}$ 、 $V_{cd}^{\#}$ 和 $V_{cq}^{\#}$ 分别表示在 dq 轴下并网逆变器电流和电压信号, G_v^{inv} 和 G_i^{inv} 表示电压/电

流双闭环比例积分 (Proportional integral, PI) 控制器 ($G_v^{inv} = k_{vp}^{inv} + k_{vi}^{inv}/s$ 和 $G_i^{inv} = k_{ip}^{inv} + k_{ii}^{inv}/s$), K 表示反馈系数. 此外, 瞬时有功功率 p_{inv} 和无功功率 q_{inv} 通过式 (9)、式 (10) 提供, 低通滤波器被应用至逆变器当中以获取平滑波动的有功功率 P_{inv} 和无功功率 Q_{inv} , 基于此, 逆变器的输出有功功率和无功功率如下所示:

$$p_{inv} = 1.5 (V_{cd}I_{cd} + V_{cq}I_{cq}) \quad (9)$$

$$q_{inv} = 1.5 (V_{cd}I_{cq} - V_{cq}I_{cd}) \quad (10)$$

$$P_{inv} = \frac{\omega_f}{s + \omega_f} p_{inv} \quad (11)$$

$$Q_{inv} = \frac{\omega_f}{s + \omega_f} q_{inv} \quad (12)$$

式中, ω_f 表示低通滤波器的截止频率. 如图 3 所示, 在内嵌数字控制系统的并网逆变器系统, 系统等效延时由 3 部分组成, 即, 信息/物理层的采样延迟时间和信息层的计算延迟时间可以表征为 $G(\tau_1)$, 其中 $\tau_1 = T_s$, T_s 表示采样周期, 即采样频率的倒数, $T_s = 1/f_s$, 物理层的脉宽调制延迟时间可以表征为 $G(\tau_2)$, 其中 $\tau_2 = 0.5T_w$, T_w 表示脉宽调制周期, 即开关频率的倒数, $T_w = 1/f_w$. 传统上, 采样周期和脉宽调制周期往往取值相同^[24]. 基于此, 系统等效延时可以表示为 $G(\tau) = e^{-\tau s} = e^{-1.5T_s s} = e^{-1.5T_w s} = e^{-1.5Ts}$, 其中, T 表示系统采样或开关周期. 因此, 式 (11)、式 (12) 可以表示为:

$$P_{inv} = \frac{\omega_f}{s + \omega_f} e^{-1.5T_s} p_{inv} \quad (13)$$

$$Q_{inv} = \frac{\omega_f}{s + \omega_f} e^{-1.5T_s} q_{inv} \quad (14)$$

式中, s 表示拉普拉斯因子, 根据文献 [13] 可知, $e^{-1.5Ts} = 4f - 3s/4f + 3s$, 其中 f 表示系统采样或开关频率. 下垂控制器可以表示为

$$\omega = \omega^\# - mP_{inv} \quad (15)$$

$$V_{cd}^\# = V^\# - nQ_{inv} \quad (16)$$

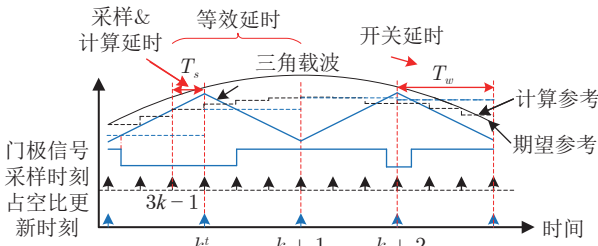


图 3 时间延时构成

Fig. 3 Time-delay components

式中, $\omega^\#$ 和 $V^\#$ 分别表示额定角频率和电压, 依据动态矢量技术^[27], 式 (1)、式 (2) 和式 (7)、式 (8) 进行偏差分析, 其中主要利用的原理: $x = y = x^\# + \Delta x = y^\# + \Delta y \rightarrow \Delta x = \Delta y$, 因此, $\Delta I_{inv}^\#$ 的小信号模型为:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{invd}^\# \\ \Delta I_{invg}^\# \end{bmatrix} = [B1]_{2 \times 2} \begin{bmatrix} \Delta I_{invd} \\ \Delta I_{invg} \end{bmatrix} + [B2]_{2 \times 2} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta V_{cd}^\# \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中

$$[B1]_{2 \times 2} = \text{diag} \left\{ \frac{R_{inv} + sL_{inv} + G_i^{inv}(s)}{G_i^{inv}(s)}, \frac{R_{inv} + sL_{inv} + G_i^{inv}(s)}{G_i^{inv}(s)} \right\}$$

$$[B2]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} -\frac{I_{invg}^\# L_{inv}}{G_i^{inv}(s)} & 0 \\ \frac{I_{invd}^\# L_{inv}}{G_i^{inv}(s)} & 0 \end{bmatrix}$$

建立式 (3) ~ 式 (6) 的小信号模型:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{invd} \\ \Delta I_{invg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta I_{cd} \\ \Delta I_{cq} \end{bmatrix} + [B3]_{2 \times 2} \begin{bmatrix} \Delta V_{cd} \\ \Delta V_{cq} \end{bmatrix} + [B4]_{2 \times 2} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta V_{cd}^\# \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{invd}^\# \\ \Delta I_{invg}^\# \end{bmatrix} = [B5]_{2 \times 2} \begin{bmatrix} \Delta V_{cd} \\ \Delta V_{cq} \end{bmatrix} + [B6]_{2 \times 2} \begin{bmatrix} \Delta I_{cd} \\ \Delta I_{cq} \end{bmatrix} + [B7]_{2 \times 2} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta V_{cd}^\# \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中

$$[B3]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} sC_{inv} & -\omega^\# C_{inv} \\ \omega^\# C_{inv} & sC_{inv} \end{bmatrix}$$

$$[B4]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ V_{cd}^\# C_{inv} & 0 \end{bmatrix}$$

$$[B5]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} -G_v^{inv}(s) & -\omega^\# C_{inv} \\ \omega^\# C_{inv} & -G_v^{inv}(s) \end{bmatrix}$$

$$[B6]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix}$$

$$[B7]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 0 & G_v^{inv}(s) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式 (11) ~ 式 (16) 的小信号模型为:

$$\Delta p_{inv} = 1.5(V_{cd}\Delta I_{cd} + \Delta V_{cd}I_{cd} + V_{cq}\Delta I_{cq} + \Delta V_{cq}I_{cq}) \quad (20)$$

$$\Delta q_{inv} = 1.5(V_{cd}\Delta I_{cq} + \Delta V_{cd}I_{cq} - V_{cq}\Delta I_{cd} - \Delta V_{cq}I_{cd}) \quad (21)$$

$$\Delta\omega = -\frac{m\omega_f}{s + \omega_f} \frac{4f - 3s}{4f + 3s} \Delta p_{inv} \quad (22)$$

$$\Delta V_{cd}^{\#} = -\frac{n\omega_f}{s + \omega_f} \frac{4f - 3s}{4f + 3s} \Delta q_{inv} \quad (23)$$

相似地, 以矩阵形式表征式 (20) ~ 式 (23):

$$\begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta V_{cd}^{\#} \end{bmatrix} = [B8]_{2 \times 2} \begin{bmatrix} \Delta V_{cd} \\ \Delta V_{cq} \end{bmatrix} + [B9]_{2 \times 2} \begin{bmatrix} \Delta I_{cd} \\ \Delta I_{cq} \end{bmatrix} \quad (24)$$

其中

$$[B8]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} B811 & B812 \\ B821 & B822 \end{bmatrix}$$

$$B811 = \frac{1.5m\omega_f}{s + \omega_f} \frac{4f - 3s}{4f + 3s} I_{cd}^{\#}$$

$$B812 = -\frac{1.5m\omega_f}{s + \omega_f} \frac{4f - 3s}{4f + 3s} I_{cq}^{\#}$$

$$B821 = -\frac{1.5n\omega_f}{s + \omega_f} \frac{4f - 3s}{4f + 3s} I_{cd}^{\#}$$

$$B822 = -\frac{1.5n\omega_f}{s + \omega_f} \frac{4f - 3s}{4f + 3s} I_{cq}^{\#}$$

$$[B9]_{2 \times 2} = \text{diag} \left\{ -\frac{1.5m\omega_f}{s + \omega_f} \frac{4f - 3s}{4f + 3s} V_{cd}^{\#}, -\frac{1.5n\omega_f}{s + \omega_f} \frac{4f - 3s}{4f + 3s} V_{cq}^{\#} \right\}$$

由于下垂逆变器的输出阻抗矩阵 $\mathbf{Z}_{inv} = \begin{bmatrix} Z_{dd} & Z_{dq} \\ Z_{qd} & Z_{qq} \end{bmatrix}$, 满足如下的等式关系 $\begin{bmatrix} \Delta V_{cd} \\ \Delta V_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{dd} & Z_{dq} \\ Z_{qd} & Z_{qq} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta I_{cd} \\ \Delta I_{cq} \end{bmatrix}$. 因此, 将式 (18)、式 (19) 和式 (24) 代入式 (17), 可以得到逆变器的输出阻抗矩阵:

$$\mathbf{Z}_{inv} = \begin{bmatrix} Z_{dd} & Z_{dq} \\ Z_{qd} & Z_{qq} \end{bmatrix} = \{ [B5] + [B7][B8] - [B1][B3] - [B1][B4][B8] - [B2][B8] \}^{-1} \cdot \{ [B1][B4][B9] + [B1] + [B2][B9] - [B6] - [B7][B9] \} \quad (25)$$

最后, 弱电网的输入导纳矩阵如下^[26]:

$$\mathbf{Y}_g = \mathbf{Z}_g^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{dd} & Z_{dq} \\ Z_{qd} & Z_{qq} \end{bmatrix}^{-1} \quad (26)$$

$$Z_{dd} = Z_{qq} = \frac{[C1]s^2 + [C2]s + [C3]}{[C4]s^2 + [C5]s + [C6]}$$

$$Z_{dq} = -Z_{qd} = \frac{[C7]}{[C4]s^2 + [C5]s + [C6]}$$

$$[C1] = (L_g C_g + R_g C_g) L_g$$

$$[C2] = L_g R_g C_g + R_s^2 C_g + L_g$$

$$[C3] = (L_g C_g + R_g C_g) L_g \omega^{\#2} + R_g$$

$$[C4] = (L_g C_g + R_g C_g)^2$$

$$[C5] = 2(L_g C_g + R_g C_g)$$

$$[C6] = (L_g C_g + R_g C_g)^2 \omega^{\#2} + 1$$

$$[C7] = (L_g C_g + R_g C_g) R_g \omega^{\#} - L_g \omega^{\#}$$

式中, R_g 、 L_g 和 C_g 分别表示等效交流母线的电阻、电感和电容; $\omega^{\#}$ 表示系统额定频率. 因此, 内嵌等效延时的微电网系统的等效回比矩阵如下:

$$\mathbf{R}_0 = \mathbf{Z}_{inv} \mathbf{Y}_g \quad (27)$$

同时, 微电网系统的等效回比矩阵是等效延时时间的函数, 即, $\mathbf{R}_0 = h(T)$. 根据阻抗稳定判据^[23], 当等效回比矩阵的广义奈奎斯特曲线不包含 $(-1, 0)$ 点时, 系统稳定性可以得到保证.

2 自适应步长搜索算法

由于复杂的奈奎斯特曲线簇绘制过程不利于参数的设计, 相关学者相继提出了如图 4 所示的稳定禁止区域判据, Middlebrook 判据、对立的观点判据、GMPM 判据和 NSFR 判据^[28], 其中 $\text{Re}(\cdot)$ 代表实部, $\text{Im}(\cdot)$ 代表虚部. 相较于前三种禁止区域判据, NSFR 判据具备更低的保守性. 当 ε_{GM} 趋向于 1 且 θ_{PM} 趋向于 0 时, NSFR 判据可以转化为近似充要条件. 因此本文选用 NSFR 判据以分析延时依赖的等效回比矩阵的稳定性.

引理 1^[23]. 如果微电网系统等效回比矩阵的相反数 $(-\mathbf{R}_0)$ 不包围 $(1, 0)$ 点, 则微电网系统的电磁时间尺度稳定性可以得到保证.

因此, 互联系统电磁时间尺度稳定运行区域可以通过 $-\mathbf{R}_0$ 得到 (如图 5 中深色区域所示). 进而, 稳定运行区域可以由三个子区域的并集得到 (如图 6 中深色区域所示), 即 $A = A_1 \cup A_2 \cup A_3$. 其中 A_1 可以通过平移映射将原矩阵转化为 Hurwitz 矩阵 \mathbf{R}_1 所构成的空间平面, A_2 和 A_3 可以分别通过转映射将原矩阵转化为 Hurwitz 矩阵 \mathbf{R}_2 和 \mathbf{R}_3 , 进而可以将 \mathbf{R}_1 、 \mathbf{R}_2 和 \mathbf{R}_3 定义为等效回比矩阵:

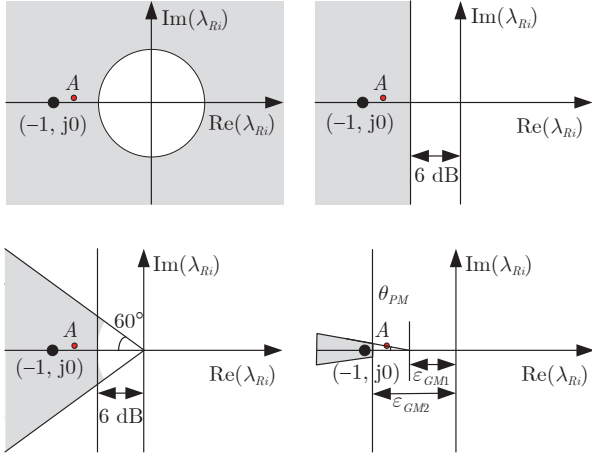


图 4 稳定禁止判据

Fig. 4 Stability forbidden criterion

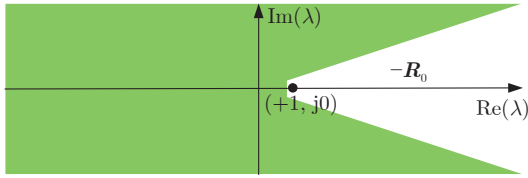


图 5 稳定运行区域

Fig. 5 Stability operation region

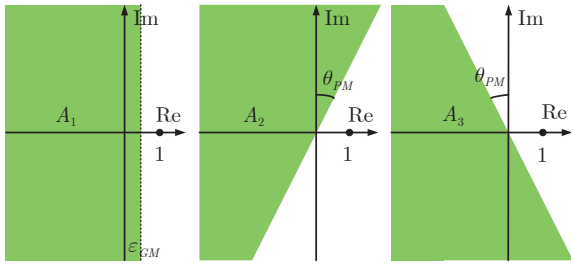


图 6 稳定运行区域集合

Fig. 6 Set of stability operation regions

$$A_1 : \mathbf{R}_1 = -\mathbf{R}_0 - \varepsilon_{GM} \mathbf{E} \quad (28)$$

$$A_2 : \mathbf{R}_2 = -\mathbf{R}_0 \times e^{j\theta_{PM}} \quad (29)$$

$$A_3 : \mathbf{R}_3 = -\mathbf{R}_0 \times e^{-j\theta_{PM}} \quad (30)$$

式中, \mathbf{R}_1 、 \mathbf{R}_2 和 \mathbf{R}_3 是 Hurwitz 矩阵. \mathbf{E} 表示单位矩阵.

注 1. 文献 [25] 所采用的方法是奈奎斯特稳定判据, 该方法更适用于已知系统的稳定性判别, 而难以给出稳定运行区间的范围. 奈奎斯特法求取稳定区间的极限需要成千上万次绘制奈奎斯特曲线或波特图, 随着可再生能源数量的递增, 该方法将极大地耗费人力资源, 因此, 文献 [29] 明确指出“奈奎斯特判据复杂, 难以适用于交流网络的系统设计”.

基于此, 本文将采样/开关频率阈值辨识问题转化为矩阵 Hurwitz 辨识问题, 从而消除了奈奎斯特曲线或波特图, 降低了计算负担. 同时相较于文献 [29] 提出的范数判据方法, 本文方法的保守性更低.

接着, 将提供逆变器的极限开关/采样频率阈值. 通过上述分析可知, 当 \mathbf{R}_1 、 \mathbf{R}_2 和 \mathbf{R}_3 是 Hurwitz 矩阵时, 系统的稳定性可以得到保证, 基于此, 等效回比矩阵是采样/开关频率依赖的非线性时不变矩阵. 因此, 本文提出基于等效回比矩阵的自适应步长搜索算法以获取微电网稳定下的采样/开关频率极限阈值. 为了增强算法的适应性, 本文采用最小均方 (Least mean square, LMS) 作为生长因子:

$$r(m+1) = r(m) + \text{sign}(L_{\min}) \times \Delta r(0) \times |L_{\min}|^{\lambda(m)} \quad (31)$$

$$\lambda(m) = \alpha \times \left(1 + e^{-\beta|s(m)|^2}\right) \quad (32)$$

$$s(m) = \gamma s(m-1) + (1-\gamma) L_{\min} \quad (33)$$

式中, $\text{sign}(\cdot)$ 表示符号函数, L_{\min} 表示等效回比矩阵的最小特征根的实部, $|L_{\min}|^{\lambda(m)}$ 和 $\lambda(m)$ 表示可变步长因子和步长增长因子, α 和 β 表示调整因子, γ 表示遗忘因子, 详细的计算步骤如下所示:

算法 1. 自适应步长搜索算法

初始化. 全局变量 $r(0) = 0$, $m = 0$ 和 $\Delta r(0) = 0$.

迭代.

1) 初始化局部变量, 如 $L_{\max 1} = \emptyset$, $L_{\max 2} = \emptyset$, $L_{\max 3} = \emptyset$ 和 $i = 1$;

2) 计算微电网的等效回比矩阵 $\mathbf{R}(s)$, 其中 $s = -j2\pi f_i$. 在此频率下, 分别计算等效回比矩阵 \mathbf{R}_1 、 \mathbf{R}_2 和 \mathbf{R}_3 ;

3) 计算三个等效回比矩阵的最大实部, 即 $L_1 = \max(\text{real}(\text{eig}(\mathbf{R}_1)))$ 、 $L_2 = \max(\text{real}(\text{eig}(\mathbf{R}_2)))$ 和 $L_3 = \max(\text{real}(\text{eig}(\mathbf{R}_3)))$;

4) 扩展矩阵, $L_{\max 1} = [L_{\max 1}, L_1]$ 、 $L_{\max 2} = [L_{\max 2}, L_2]$ 和 $L_{\max 3} = [L_{\max 3}, L_3]$. 如果 $i < 20\,000$, $i = i + 1$, 然后返回第 2) 步, 否则进行第 5) 步;

5) 选取 $L_{\max 1}$ 、 $L_{\max 2}$ 和 $L_{\max 3}$ 中的最大值, 即 $L_{\max-1} = \max(L_{\max 1})$ 、 $L_{\max-2} = \max(L_{\max 2})$ 和 $L_{\max-3} = \max(L_{\max 3})$. 定义 L_{\min} 是 $L_{\max-1}$ 、 $L_{\max-2}$ 和 $L_{\max-3}$ 中的最小值, 即 $L_{\min} = \min(L_{\max-1}, L_{\max-2}, L_{\max-3})$;

6) 判断 $r(m)$ 下 L_{\min} 是否等于 0. 若判别结果为是, 则存储开区间 $(0, r(m))$ 的记录, 然后进入第 7) 步. 反之 $r(m+1) = r(m) + \text{sign}(L_{\min}) \times \Delta r(0) \times |L_{\min}|^{\lambda(m)}$, 然后返回第 1) 步;

7) 计算第 6) 步中的所有开集合的集合, 记录的结果为等效延时的最大值 T_{\max} .

注 2. 算法中 i 的上限取值为 20 000, 即验证频率从 $[0, 20\,000]$ Hz 情况下系统的极限开关频率. 选取 20 000 的原因在于, 本文研究的动机是探究随着开关频率降低所导致的低频和次/超同步振荡等宽频振荡现象的诱发条件. 而宽频振荡的范围是 $[0, 3\,000]$ Hz 左右, 为保证极端条件下本文方法的有效性而提高了频率的验证范围. 如果工程师希望快速计算结果, 可以将其上限降低至 3 000. 上述自适应步长搜索算法可以获得在等效回比矩阵 Hurwitz 情况下的最大等效延时时间. 因此, 采样/开关频率阈值为 $f_{\min} = 1/T_{\max}$. 同时上述所提出的自适应步长搜索算法属于二分法的一类变型, 同时 L_{\min} 和 $r(m)$ 的关系如图 7 所示, 其存在单调递增特性^[14]. 因此, 系统的收敛性可以得到很好保证, 并且不受初始值选取的影响.

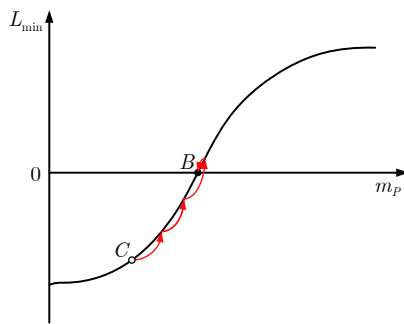


图 7 L_{\min} 和 T_{\max} 的关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between L_{\min} and T_{\max}

注 3. 本文所指的适应性主要针对算法的收敛速度, 确保本方法适用于对计算时间要求较高的系统. 由于传统的固定步长的搜索方法的收敛较慢, 因此, 本文利用指数函数的特性, 在收敛点处 (0 值处) 变化率低和远离收敛点处变化率高的特点. 换言之, 确保在收敛点附近, 按照小步长搜索, 在远离收敛点处, 按照大步长搜索. 其中通过设定最小均方作为指数项, 利用指数函数的性质可以提高本算法的收敛速度, 从而提高本算法的适用性, 应对高计算速度要求的系统.

3 仿真实验

为了验证本文所提出的信息能源系统信-物融合的稳定性的有效性, 本文选取文献 [30] 所表征的系统和控制器参数. 相关的控制参数如表 1 所示, 并网逆变器数量选取为 3 个, 弱电网的电路阻抗为 $R_g = 0.25 \Omega$, $L_g = 10 \text{ mH}$, $C_g = 100 \mu\text{F}$. 本文基于等效回比矩阵的自适应步长搜索算法而获取微电网稳定下的采样/开关频率极限阈值为 3.662 kHz. 本文将分别验证系统不同开关/采样频率下系统的

表 1 仿真系统参数表
Table 1 Simulation system parameters

参数	数值
电压控制器	$G_v^{inv} = 1 + 8/s$
电流控制器	$G_c^{inv} = 4 + 150/s$
母线电压	700 V
额定电压	220 V
额定频率	50 Hz
截止频率	5 Hz
滤波器电容	600 μF
滤波器电感	6 mH

稳定性, 基于实际的 Matlab/Simulink 仿真软件所搭建仿真测试平台, 利用弱电网和并网逆变器之间的交流母线电压的波形情况, 来验证本文基于等效回比矩阵的自适应步长搜索算法的有效性. 具体的 4 组仿真验证案例如下所示:

1) 首先, 微电网系统的开关/采样频率选取为 4 kHz, 很明显, 此开关/采样频率大于提出的自适应步长搜索算法所求解得到的阈值频率, 因此, 系统可以保持稳定. 但基于文献 [29], 如图 8 所示, 系统的回比矩阵的无穷范数在 $[126 \text{ Hz}, 212 \text{ Hz}]$ 的范围内大于 1, 因此系统可能发生失稳现象. 系统实际的电压波形图如图 9 所示, 通过观察图 9 所示的波形图可知, 弱电网和并网逆变器之间的交流母线电压恒定保持在 220 V/50 Hz, 由此可见系统保持了良好的稳定性. 相较于现存范数方法, 本文所提方法的保守性较低.

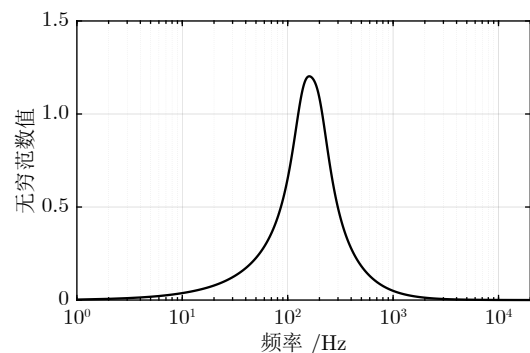


图 8 无穷范数判据

Fig. 8 Infinite norm criterion

2) 微电网系统的开关/采样频率选取 3.5 kHz, 很明显, 此开关/采样频率略小于提出的辨识策略求解得到的阈值频率, 因此, 系统难以保持系统的绝对稳定. 系统实际的电压波形图如图 10 所示, 系统发生轻度的低频振荡.

3) 微电网系统的开关/采样频率选取 3 kHz,

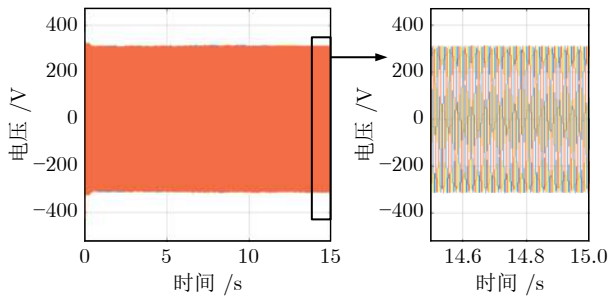


图 9 绝缘栅双极型晶体管开关频率 4 kHz 下电压波形
Fig.9 Voltage waveform under 4 kHz of insulated gate bipolar transistor

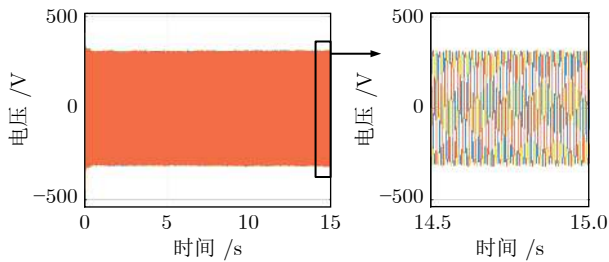


图 10 绝缘栅双极型晶体管开关频率 3.5 kHz 下电压波形
Fig.10 Voltage waveform under 3.5 kHz of insulated gate bipolar transistor

很明显, 此开关/采样频率明显小于提出的辨识策略求解得到的阈值频率, 因此, 系统极易发生失稳现象. 系统实际的电压波形图如图 11 所示, 系统发生大幅的低频振荡.

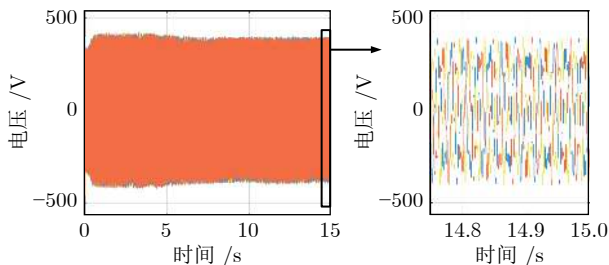


图 11 绝缘栅双极型晶体管开关频率 3 kHz 下电压波形
Fig.11 Voltage waveform under 3 kHz of insulated gate bipolar transistor

4) 微电网系统的开关/采样频率选取 2 kHz, 很明显, 此开关/采样频率远远小于提出的辨识策略求解得到的阈值频率, 因此, 系统必然发生失稳现象. 系统实际的电压波形图如图 12 所示, 系统大幅度的发散振荡, 如果不采用有效抑制措施, 系统将会诱发过流/过压保护而发生解列等极端现象.

综上所述, 本文提出的基于等效回比矩阵的自适应步长搜索算法的有效性得到了很好验证, 其可以有效指导实际微电网开关/采样频率的选取, 避

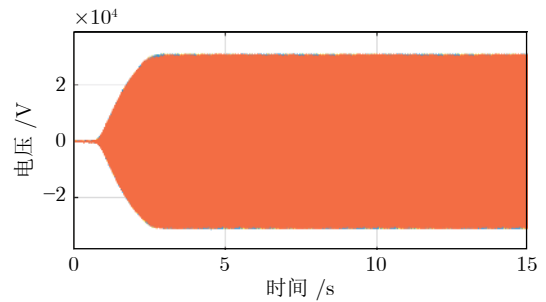


图 12 绝缘栅双极型晶体管开关频率 2 kHz 下电压波形
Fig.12 Voltage waveform under 2 kHz of insulated gate bipolar transistor

免系统出现信息-物理融合影响而导致的失稳现象.

4 硬件在环实验验证

为更好地验证本文提出的基于等效回比矩阵的自适应步长搜索算法的有效性, 本文在如图 13 所示的微电网系统的实验平台进行验证, 相关控制和物理拓扑参数与仿真验证平台相同, 同时 3 台逆变器由 TMS320F28335 DSP 控制, 硬件拓扑内嵌于 OPAL-RT OP5600.



图 13 半实物测试系统图
Fig.13 Hardware in the loop test system diagram

在此情境下, 基于所提出的基于等效回比矩阵的自适应步长搜索算法而获取微电网稳定下的采样/开关频率极限阈值依旧是 3.662 kHz. 相似于第 3 部分的仿真验证模块, 分别选取微电网系统的开关/采样频率为 4 kHz、3.5 kHz 和 3 kHz. 当微电网的开关/采样频率为 4 kHz 时, 此场景中系统的开关/采样频率大于提出的辨识策略求解得到的阈值频率, 因此, 系统可以保持稳定. 系统实际的电压波形如图 14 所示, 系统保持了良好的稳定性.

当微电网的开关/采样频率为 3.5 kHz 时, 此场景中系统的开关/采样频率小于提出的辨识策略求解得到的阈值频率, 因此, 系统难以保持绝对稳定. 系统实际的电压波形图如图 15 所示, 系统发生轻微低频振荡.

当微电网的开关/采样频率为 3 kHz 时, 此场

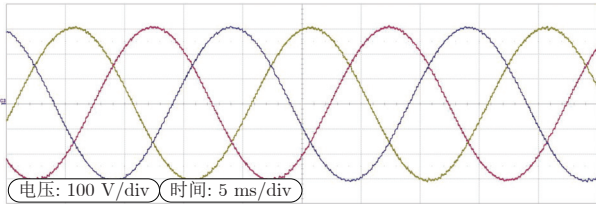


图 14 绝缘栅双极型晶体管开关频率 4 kHz 下实验电压波形

Fig. 14 Experimental voltage waveform under 4 kHz of insulated gate bipolar transistor

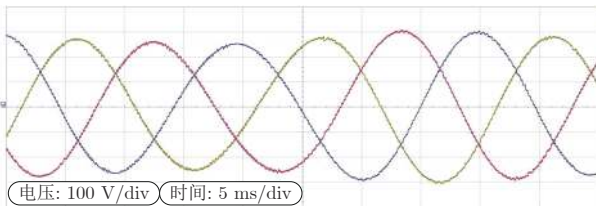


图 15 绝缘栅双极型晶体管开关频率 3.5 kHz 下实验电压波形

Fig. 15 Experimental voltage waveform under 3.5 kHz of insulated gate bipolar transistor

景中系统的开关/采样频率小于提出的辨识策略求解得到的阈值频率, 因此, 系统的稳定性将得不到保证. 系统实际的电压波形图如图 16 所示, 系统发生失稳现象. 综上所述, 本文提出的基于等效回比矩阵的自适应步长搜索算法的有效性得到验证.

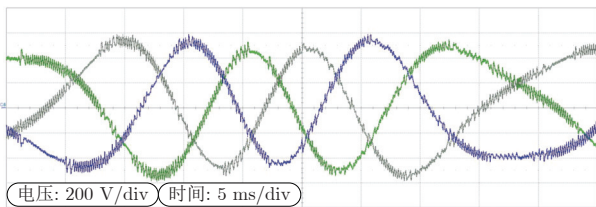


图 16 绝缘栅双极型晶体管开关频率 3 kHz 下实验电压波形

Fig. 16 Experimental voltage waveform under 3 kHz of insulated gate bipolar transistor

5 结束语

内嵌数字控制系统的并网逆变器系统是一种最简单和典型的信息能源系统, 同时从效率的角度出发, 逆变器的开关/采样频率总是选择尽可能低的频率, 势必产生系统固有延迟时间. 基于此, 本文提出了一种基于稳定性的开关/采样频率阈值辨识方法. 本文具有 3 个主要的创新点/贡献点: 1) 构建了内嵌等效时延的广义阻抗回比矩阵, 该等效延迟时间由信息/物理层的采样延迟时间、信息层的计算延迟时间和物理层的脉宽调制延迟时间 3 部分组

成. 其有效反映了信息-物理相互融合作用的影响和为后续系统采样/开关频率阈值辨识提供模型基础. 2) 利用柏德逼近技术将延时转化为频率分数函数, 进而将系统采样/开关频率阈值的求解问题转化为等效回比矩阵为 Hurwitz 的辨识问题. 其消除了传统阻抗技术中所涉及的广义奈奎斯特判据复杂度高的问题, 进而可以获得工程可用的稳定性判据. 3) 提出了基于自适应步长搜索算法的采样/开关频率阈值辨识技术, 其能够获得信息能源系统采样/开关频率阈值, 指导实际微电网开关/采样频率的选取, 避免系统出现信息-物理融合影响而导致的失稳现象, 最后, 仿真和实验结果验证了该方法的有效性. 未来并网逆变器类系统三级控制体系的整体信息-物理稳定性分析技术势必成为研究的重点领域. 同时, 随着高比例的可再生能源和高占比的电力变化设备接入能源系统, 稳定机理分析及其抑制技术也将成为待研究的重点内容.

References

- 1 Yang Tao, Chai Tian-You. Research status and prospects of distributed collaborative optimization. *Scientia Sinica Technologica*, 2020, **50**(11): 1414-1425
(杨涛, 柴天佑. 分布式协同优化的研究现状与展望. 中国科学: 技术科学, 2020, **50**(11): 1414-1425)
- 2 Sun Chang-Yin, Wu Guo-Zheng, Wang Zhi-Heng, Cong Yang, Mu Chao-Xu, He Wei. On challenges in automation science and technology. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(2): 464-474
(孙长银, 吴国政, 王志衡, 丛杨, 穆朝絮, 贺威. 自动化学科面临的挑战. 自动化学报, 2021, **47**(2): 464-474)
- 3 Yuan Hao-Nan, Guo Ge. Vehicle cooperative optimization scheduling in transportation cyber physical systems. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(1): 143-152
(原豪男, 郭戈. 交通信息物理系统中的车辆协同运行优化调度. 自动化学报, 2019, **45**(1): 143-152)
- 4 Georg H, Müller S C, Rehtanz C. Analyzing cyber-physical energy systems: The Inspire cosimulation of power and ICT systems using HLA. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, **10**(4): 2364-2373
- 5 Yang Fei-Sheng, Wang Jing, Pan Quan, Kang Pei-Pei. Resilient event-triggered control of grid cyber-physical systems against cyber attack. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(1): 110-119
(杨飞生, 汪璟, 潘泉, 康沛沛. 网络攻击下信息物理融合电力系统的弹性事件触发控制. 自动化学报, 2019, **45**(1): 110-119)
- 6 Satchidanandan B, Kumar P R. Dynamic watermarking: Active defense of networked cyber-physical systems. *Proceedings of the IEEE*, 2017, **105**(2): 219-240
- 7 Cao J, Ding D, Liu J, Tian E, Hu S, Xie X. Hybrid-triggered-based security controller design for networked control system under multiple cyber attacks. *Information Sciences*, 2021, **548**(10): 69-84
- 8 Eslami A, Huang C, Zhang J, Cui S. Load-dependent cascading failures in finite-size Erdős-Rényi random networks. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2017, **4**(2): 129-139
- 9 Miller J, Xiang Z, Kesidi G. Adversarial learning targeting deep neural network classification: A comprehensive review of defenses against attacks. *Proceedings of the IEEE*, 2020, **108**(3): 402-433
- 10 Xu L, Guo Q, Wang Z, Sun H. Modeling of time-delayed distrib-

- uted cyber-physical power systems for small-signal stability analysis. *IEEE Transactions on Smart Grid*, DOI: 10.1109/TSG.2021.3052303
- 11 Zhang Yi-Mei, Dong Chao-Yu, Dong Xiao-Hong, Xiao Qian, Zhang Ming-Dong, Jia Hong-Jie. Spectral feature and stability assessment for cyber-energy system with frequency regulation of electric vehicle cluster. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, **45**(2): 12–20
(张一媚, 董朝宇, 董晓红, 肖迁, 张明东, 贾宏杰. 含电动汽车集群调频的信息能源系统谱特征和稳定性评估. *电力系统自动化*, 2021, **45**(2): 12–20)
 - 12 Wang R, Sun Q, Zhang P, Gui Y, Qin D, Wang P. Reduced-order transfer function model of the droop-controlled inverter via Jordan continued-fraction expansion. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2020, **35**(3): 1585–1595
 - 13 He X, Wang R, Wu J, Li W. Nature of power electronics and integration of power conversion with communication for talkative power. *Nature Communications*, 2020, **11**(1): 2479–2490
 - 14 Dong C, Xiao Q, Wang M, Morstyn T, McCulloch M D, Jia H. Distorted stability space and instability triggering mechanism of EV aggregation delays in the secondary frequency regulation of electrical grid-electric vehicle system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, **11**(6): 5084–5098
 - 15 Rasheduzzaman M, Mueller J A, Kimball J W. Reduced-order small-signal model of microgrid systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, **6**(4): 1292–1305
 - 16 Luo L, Dhople S V. Spatiotemporal model reduction of inverter-based islanded microgrids. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2014, **29**(4): 823–832
 - 17 Dorfler F, Bullo F. Kron reduction of graphs with applications to electrical networks. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2013, **60**(1): 150–163
 - 18 Wang Rui, Sun Qiu-Ye, Zhang Hua-Guang. Research on current sharing/voltage recovery based adaptive dynamic programming control strategy of microgrids. *Acta Automatica Sinica*, 2022, **48**(2): 479–491
(王睿, 孙秋野, 张化光. 微电网的电流均衡/电压恢复自适应动态规划策略研究. *自动化学报*, 2022, **48**(2): 479–491)
 - 19 Zhou J H, Shi P, Gan D Q, Xu Y, Xin H H, Jiang C M, et al. Large-scale power system robust stability analysis based on value set approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, **32**(5): 4012–4023
 - 20 Wu W, Chen Y, Zhou L, Zhou X, Yang L, Dong Y, et al. A virtual phase-lead impedance stability control strategy for the maritime VSC-HVDC system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, **14**(12): 5475–5486
 - 21 Liu F, Liu J, Zhang H, Xue D. Stability issues of Z+Z type cascade system in hybrid energy storage system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, **29**(11): 5846–5859
 - 22 Wang R, Sun Q, Ma D, Qin D, Gui Y, Wang P. Stability assessment of grid-connected converter system based on impedance model and gershgorin theorem. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2020, **35**(3): 1559–1566
 - 23 Wang R, Sun Q, Ma D, Qin D, Gui Y, Wang P. Line inductance stability operation domain assessment for weak grids with multiple constant power loads. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, **36**(2): 1045–1055
 - 24 Lu Zi-Bao, Zhong Shang-Peng, Guo Ge. Design of droop controller for DC microgrid based on distributed strategy. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(10): 2472–2483
(卢自宝, 钟尚鹏, 郭戈. 基于分布式策略的直流微电网下垂控制设计. *自动化学报*, 2021, **47**(10): 2472–2483)
 - 25 Pan D, Ruan X, Bao C, Li W, Wang X. Capacitor-current-feedback active damping with reduced computation delay for improving robustness of LCL-Type grid-connected inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, **29**(7): 3414–3427
 - 26 Radwan A A A, Mohamed Y A I. Analysis and active-impedance-based stabilization of voltage-source-rectifier loads in grid-connected and isolated microgrid applications. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, **4**(3): 563–576
 - 27 Wang R, Sun Q Y, Ma D Z, Liu Z W. The small-signal stability analysis of the droop-controlled converter in electromagnetic timescale. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, **10**(3): 1459–1469
 - 28 Riccobono A, Santi E. Comprehensive review of stability criteria for DC power distribution systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, **50**(5): 3525–3535
 - 29 Liu Z, Liu J, Bao W, Zao Y. Infinity-norm of impedance based stability criterion for three phase AC distributed power systems with constant power loads. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, **30**(6): 3030–3043
 - 30 Wang R, Sun Q, Hu W, Xiao J, Zhang H, Wang P. Stability-oriented droop coefficients region identification for inverters within weak grid: An impedance-based approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, **51**(4): 2258–2268



王睿 东北大学信息科学与工程学院讲师. 主要研究方向为能源互联网中分布式电源的协同优化及其电磁时间尺度稳定性分析.

E-mail: 1610232@stu.neu.edu.cn

(WANG Rui) Lecturer at the College of Information Science and Engineering, Northeastern University. His research interest covers collaborative optimization of distributed generation and its stability analysis of electromagnetic timescale in energy internet.)



孙秋野 东北大学信息科学与工程学院教授. 主要研究方向为网络控制技术, 分布式控制技术, 分布式优化分析及其在能源互联网, 微网, 配电网领域相关应用. 本文通信作者.

E-mail: sunqiuye@mail.neu.edu.cn

(SUN Qiu-Ye) Professor at the College of Information Science and Engineering, Northeastern University. His research interest covers network control technology, distributed control technology, distributed optimization analysis and various applications in energy internet, microgrid, power distribution network. Corresponding author of this paper.)



张化光 东北大学信息科学与工程学院教授. 主要研究方向为自适应动态规划, 模糊控制, 网络控制和混沌控制. E-mail: zhanghuaguang@mail.neu.edu.cn

(ZHANG Hua-Guang) Professor at the College of Information Science and Engineering, Northeastern University. His research interest covers adaptive dynamic programming, fuzzy control, network control, and chaos control.)