

基于锁相同步的双馈风机暂态稳定方法研究

李 晓, 王丽馨

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 随着大量双馈风电机组 (DFIG) 并入电网, 电力系统在扰动下更容易出现暂态同步失稳问题。目前双馈风机大多采用锁相环 (PLL) 实现与电网的同步, 但是这种同步方式接入电网会出现不稳定问题, 当锁相环不能同步时, 会引起并网侧甚至整个系统电压暂态失稳。将若干双馈风机并入 IEEE 10 机 39 节点系统, 双馈风电机组的同步稳定性与锁相环动态特性紧密相关, 通过利用同步相量测量装置 (Phasor Measurement Unit, PMU) 采集母线电压, 利用最大李雅普诺夫指数法分析了电力系统的暂态电压稳定性, 验证了其有效性。

关键词: 双馈风机; 锁相环; 暂态稳定; 最大李雅普诺夫指数

Research on transient stabilization method of doubly fed induction generator based on phase-locked synchronization

LI Xiao, WANG Lixin

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: With a large number of doubly-fed wind turbines (DFIG) integrated into the grid, the power system is more prone to transient synchronous instability under disturbances. At present, most of the doubly-fed fans use phase-locked loop (PLL) to achieve synchronization with the power grid, but this synchronization mode will have the problem of instability when connected to the power grid, and when the phase-locked loop cannot be synchronized, it will cause the transient instability of the voltage on the grid-connected side or even the whole system. In this paper, several doubly-fed wind turbines are incorporated into the IEEE 10-generator 39-bus system, and the synchronization stability of the doubly-fed wind turbines is closely related to the dynamic characteristics of the phase-locked loop, and the bus voltage is collected by using the phasor measurement unit (PMU), and the transient voltage stability of the power system is analyzed by the max Lyapunov exponential method, and its effectiveness is verified.

Key words: doubly-fed induction generators; phase-locked loop; transient stability; max Lyapunov exponential

0 引言

近年来, 以光伏和风电为主的分布式发电单元通过电压源型变流器大规模并入电网, 电力系

统的稳定性受到严重威胁。相较于同步发电机的同步方式, 并网变流器常常通过锁相环 (PLL) 与电网同步。因此, 针对采用PLL同步的风电并

国家重点研发计划“储能与智能电网技术”专项“响应驱动的大电网稳定性智能增强分析与控制技术”(NO.2021YFB2400802)

网系统暂态稳定问题，文献[1]基于PLL的控制特性提出了失同步的概念，明确指出PLL不仅是测量元件，更是系统与电网同步的关键因素。与传统同步机相比，双馈风力发电机缺乏惯性响应能力。因此当电路出现暂态失稳问题时，锁相出现不同步问题，造成与之相连的并网变流器失去稳定，跳闸脱网。

然而，对于风电系统的暂态稳定问题，研究仍然不够成熟，目前对含有风电机组的电力系统的暂态稳定性方法研究，大多数文献采用等面积法、相平面法、能量函数法和时域仿真法进行暂态分析。文献[2]提出了研究暂态稳定的等面积法，通过所构建函数的加减速面积来判断其稳定性，但是由于忽略了阻尼问题对于暂态稳定的影响，暂态稳定问题的研究存在很多缺陷，需要进一步改进。文献[3]提出了暂态稳定分析最常用的李雅普诺夫函数法，但是在构造能量函数方面始终无法统一，不能通用，不能获得较为简单的判稳依据。文献[4]建立了基于PLL的双馈感应发电机的并网系统模型，结合能量函数法，对系统进行了暂态稳定分析，得到风电机组同步稳定判据，即若系统总能量等于或小于故障初始能量，则得到系统暂态稳定。文献[5]运用时域仿真法和能量函数法二者结合，在网侧发生三相短路故障，并同时改变风机并网渗透率的情况下对直驱式风机并网系统进行了暂态稳定分析。文献[6]提出了一种最大李雅普诺夫指数法（MLE），以评估系统的稳定性。MLE通过采用有限的时间间隔，获得电压时间序列数，在实现暂态电压稳定评估的同时，提高了计算效率。MLE已经成为对电力系统暂态电压稳定研究的常用方法。

1 双馈风机原理概述

本文采用的双馈风力发电机模型如图1所示，该双馈风力发电机的整个系统主要由风力机、齿轮箱及传动轴系、双馈感应发电机、转子侧变流器、网侧变流器及其控制系统等组成。本文主要研究网侧变流器中的锁相环在双馈风机与网侧暂态同步稳定中的作用。

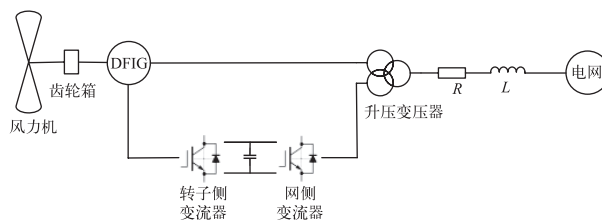


图1 双馈风机运行原理图

Fig. 1 Schematic diagram of doubly-fed induction generator

锁相环（PLL）可以实现两个电信号之间的同步，在双馈风机中的作用就是通过反馈获取电网电压的幅值、频率和相位，从而实现双馈风机和电网间的同步。文献[7]指出双馈风力发电机通常是通过锁相环（PLL）进行矢量控制，实现对有功功率和无功功率的解耦控制。对于并网电压源换流器（VSC）来说，与电网电压保持相角与频率的同步是其可靠并网的前提。电网故障后，弱电网中的并网点电压作为PLL的输入，将会使得PLL无法准确跟踪并网点电压，甚至于偏离电网的相位与频率，与电网失去同步。双馈风机采用PLL与电网进行同步，是保证系统稳定安全运行的关键性元件。

目前学者们提出了各种类型的PLL的结构，PLL采集并网侧电信号，通过闭环反馈控制，实现输出信号对输入信号的自动跟踪。锁相环原理如图2所示。对输入信号测得的并网侧电压 U_s 经过 d/q 变换后，得到了 U_{gq} 和 U_{gd} 两个分量，再通过闭环反馈控制使 U_{gq} 为0，使 d 轴与 U_s 重合，实现对并网点电压、频率和相角的测量。

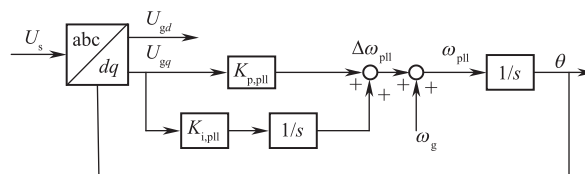


图2 锁相环原理图

Fig. 2 Schematic diagram of phase-locked loop

通过PLL控制原理所得PLL控制方程为

$$\begin{cases} \omega_{pll} = U_{gq} (K_{p,pll} + K_{i,pll}/s) + \omega_g \\ \theta_{pll} = \omega_{pll}/s \\ d\delta/dt = \omega_1 (\omega_{pll} - \omega_g) \end{cases} \quad (1)$$

式中， ω_{pll} 为PLL的输出角频率； ω_g 为PLL的电网角频率； ω_1 标准角频率； θ_{pll} 为PLL对外部的输出

相位； s 为微分算子， $K_{p,pll}$ 和 $K_{i,pll}$ 分别为锁相环的比例系数和积分系数。

2 锁相环同步原理

锁相环对于电力系统来说，是一种能够保证两个电信号相位同步的关键元件。在暂态稳定过程中，不论是发生电网故障还是故障恢复的瞬间，风机机端电压、并网点电压除了幅值跌落以外，相位也可能发生突变。相位突变会影响到双馈风电机组锁相环同步定向的准确性，同时影响风电机组的暂态运行能力与整个控制系统的控制效果。锁相环作为风机与其他发电单元能否同步运行的关键所在，在分析含风机的机电暂态仿真时需要将其考虑进来。锁相环是产生终端电压相位的重要元件，为有功和无功控制提供参考框架。通过锁相环双馈风机可以与电网同步。

双馈风电机组（DFIG）并网简化图如图3所示，PLL并网点其中， I_s 和 I_r 分别为DFIG中定子绕组以及转子绕组的电流矢量； I 为DFIG输出的总电流矢量； R 和 L 分别为外电路的等效电阻和电抗； U_g 为并网点电压； IZ 为外部线路的等效阻抗压降； U_f 为外电路故障点的电压量； δ 为双馈风机系统的等效功角，即 U_f 和 U_g 之间的夹角。在暂态调节的过程中，假设为理想的电流环，研究过程中忽略电流的自动调节过程，即 $I_s=I_s^*$ ， $I_r=I_r^*$ ，

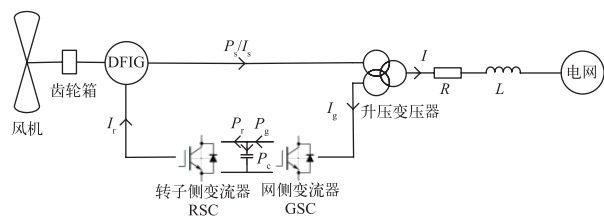


图3 DFIG并网简化图

Fig. 3 Simplified diagram of DFIG grid connection

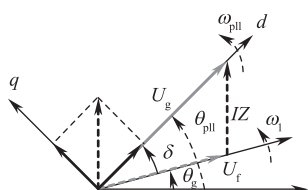


图4 PLL并网点矢量图

Fig. 4 PLL parallel point vector illustration

$I=I^*$ 。根据图3所标记的电流方向，可得出以下矢量关系

$$\begin{cases} I_s = I_s^* = i_{sd}^* + j i_{sq}^* \\ I_g = I_g^* = i_{gd}^* + j i_{gq}^* \\ I = I^* = i_d^* + j i_q^* \\ i_d = i_d^* = i_{sd}^* - i_{gd}^* \\ i_q = i_q^* = i_{sq}^* - i_{gq}^* (i_{gq}^* = 0) \end{cases} \quad (2)$$

通过图4中PLL的矢量关系，可以得到外电路 U_g 、 IZ 和 U_f 的关系为

$$\begin{cases} Z = R + j \omega_{pll} L \\ U_g = IZ + U_f \end{cases} \quad (3)$$

当电压矢量通过 d/q 变换后，并网点电压 U_g 在 d/q 轴上的表达式为

$$\begin{cases} U_{gd} = |U_f| \cos \delta + R i_d^* - \omega_{pll} L i_q^* \\ U_{gq} = -|U_f| \sin \delta + R i_q^* + \omega_{pll} L i_d^* \\ \delta = \theta_{pll} - \theta_g \end{cases} \quad (4)$$

根据PLL的原理特性可知，PLL为保持与电网的同步，需使得 $U_{gq}=0$ ， $U_{gd}=U_g$ ，因此，可以得到使PLL与外部电网保持同步的表达式为

$$\begin{cases} |U_g| = |U_f| \cos \delta + R i_d^* - \omega_{pll} L i_q^* \\ 0 = -|U_f| \sin \delta + R i_q^* + \omega_{pll} L i_d^* \end{cases} \quad (5)$$

当电力系统处于正常运行的情况下且锁相环处于稳态时，有 $U_{gq}=0$ ， $\Delta \omega_{pll}=0$ 并且 $\omega_i=\omega_g=\omega_{pll}$ 。当电网发生严重短路故障时，线路阻抗与输出电流交互作用剧烈，进而影响 U_{gq} 的值，若是在暂态期间 U_{gq} 始终无法调节到0，这说明系统不存在稳定平衡点，系统暂态失稳问题不可避免。

3 基于最大李雅普诺夫指数的暂态电压稳定评估

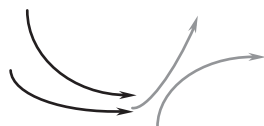
3.1 暂态电压失稳机理

电力系统中的暂态故障会导致电压不稳定。伴随着双馈风机接入系统，暂态电压稳定问题更为复杂，电力系统暂态电压评估问题需要着重研究。电力系统中的电压稳定性问题是指在发生故障或扰动后，系统中所有母线保持稳定电压的能力。电压不稳定可能导致不同母线电压的上升或

下降。电压不稳定将导致负载损失，输电线路跳闸，并可能导致最终的级联停电。根据扰动的类型，电压稳定问题可分为小扰动稳定问题和大扰动稳定问题。在故障时（例如三相短路对称故障和单相短路不对称故障），电力系统暂态电压稳定性主要表现在并网公共连接点和发电机节点处电压的骤降、逐渐恢复和持续振荡。在这个过程中，电压具有明显的动态特性。

3.2 最大李雅普诺夫指数来源

最大李雅普诺夫指数（MLE）是从动力系统的遍历理论演变而来的一种思想。MLE是系统中两条轨迹分离率的度量，用于确定系统的稳定性。当MLE指数为负时，系统的轨迹收敛到一个稳定的平衡态。如果MLE为负，则系统的轨迹收敛，如图5a所示，表明系统是稳定的；如果MLE为正，则系统的轨迹发散，如图5b所示，表明系统是不稳定系统，即混沌系统。



(a) 收敛轨迹图 (b) 发散轨迹图

图5 最大李雅普诺夫指数轨迹示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the trajectory of the max Lyapunov exponent

3.3 构建最大李雅普诺夫指数

文献[8]和文献[9]都提出利用时间序列数据计算李雅普诺夫指数的方法。该方法沿轨迹计算系统雅可比矩阵，然后利用雅可比矩阵的特征值计算李雅普诺夫指数。然而，雅可比矩阵的估计在计算上是昂贵的，并且很难在实时数据中实现。许多研究人员通过计算电压稳定指标评估实时稳定性，包括线路稳定指标和在线电压稳定指标，利用PMU数据实时评估电网电压。基于最高李雅普诺夫指数的混沌技术是实时电压评估中另一项重要技术。该技术是基于母线的李雅普诺夫指数的传播特性。基于PMU的均方根电压样本在线计算最大李雅普诺夫指数的算法概述如下：

1) 假设 $V(t)$ 是电力系统不同母线在时间 t 的暂态电压，其中 $V(t)=\{v_{t,1}, v_{t,2}, v_{t,3}, \dots, v_{t,n}\}$ ， $t=0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, M\Delta t$ ，以恒定的采样频率 f 对电压进行采样，其中 $\Delta t=1/f$ ， $\Delta t=0.02$ s。

2) 假设电压幅值偏差的上限和下限分别为 ε_1 和 ε_2 ，上限和下限满足条件 $0<\varepsilon_1<\varepsilon_2$ ，从而使得电压幅值偏差满足条件 $\varepsilon_1<\|V_{m\Delta t}-V_{(m-1)\Delta t}\|<\varepsilon_2$ ，其中 $m=1,2,3,\dots,N$ ， N 为电压采样间隔。

3) 电力系统在 $(k+m)\Delta t$ 时刻的最大李雅普诺夫指数表达式为

$$\lambda(k\Delta t) = \frac{1}{Nk\Delta t} \sum_{m=1}^N \ln \frac{\|V_{(k+m)\Delta t} - V_{(k+m-1)\Delta t}\|}{\|V_{(m)\Delta t} - V_{(m-1)\Delta t}\|} \quad (6)$$

$$= \frac{1}{Nk\Delta t} \sum_{m=1}^N \ln \frac{\|V'_{(k+m)\Delta t}\|}{\|V'_{(m)\Delta t}\|}$$

计算李雅普诺夫指数方程背后的基本思想是：上述方程测量了在 N 个初始条件下存在的电压轨迹上的分离。如果在特定时刻测量的分离小于初始分离，那么它将导致李雅普诺夫指数小于0，这意味着收敛；如果在特定时刻测量的分离大于初始分离，那么它将导致李雅普诺夫指数大于0，表示该系统发散，即不收敛。MLE原理流程如图6所示。

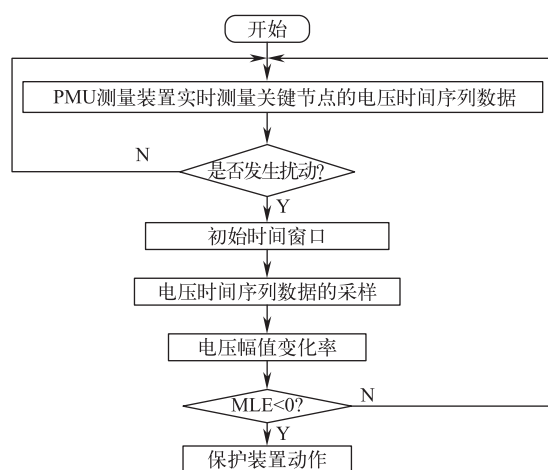


图6 最大李雅普诺夫指数流程图

Fig. 6 Flow chart of the max Lyapunov exponent

系统最大李雅普诺夫指数的方程可以稍加修改，以计算单个母线的最大李雅普诺夫指数，

通过使用来自单个母线的电压而不是来自所有母线的电压矢量来估计单个母线对系统稳定性的影响。总线*i*的李雅普诺夫指数计算式为

$$\begin{aligned}\lambda_i(k\Delta t) &= \frac{1}{Nk\Delta t} \sum_{m=1}^N \ln \frac{\|V_{(k+m)\Delta t,i} - V_{(k+m-1)\Delta t,i}\|}{\|V_{(m)\Delta t,i} - V_{(m-1)\Delta t,i}\|} \\ &= \frac{1}{Nk\Delta t} \sum_{m=1}^N \ln \frac{\|V'_{(k+m)\Delta t,i}\|}{\|V'_{(m)\Delta t,i}\|}\end{aligned}\quad (7)$$

4 仿真分析

本小节采用IEEE 10机39节点系统作为算例，将原G3、G4、G10用双馈风机代替，在母线21分别设置时间为225 ms和226 ms的三相短路故障，根据PMU所采集的电压，观察锁相环和并网侧电压的动态变化，利用最大李雅普诺夫指数法对发电机和双馈风机并网侧暂态电压进行准确和有效的分析和验证。图7为双馈风机接入IEEE 10机39节点拓扑图。

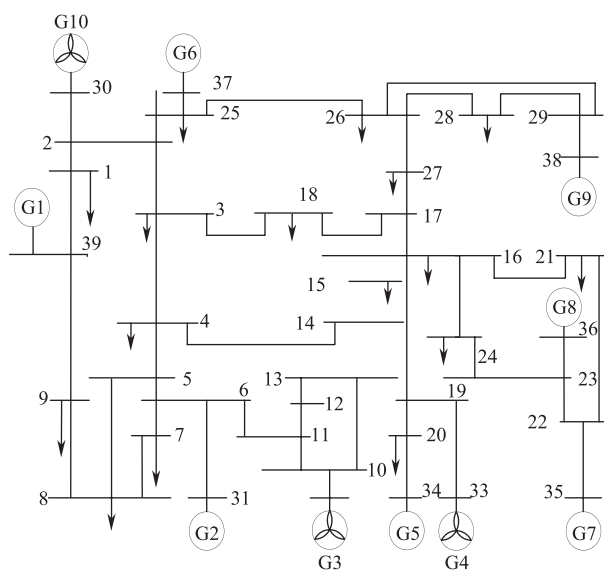


图7 双馈风机接入IEEE 10机39节点拓扑图

Fig. 7 Topology diagram of DFIG connected to IEEE 10-generator 39-bus system

4.1 在 $t=2.25$ s切除故障

在 $t=2$ s时设置三相短路故障，在 $t=2.25$ s时切除三相短路故障，故障持续时间为225 ms。PLL动态变化曲线如图8所示，通过观察PLL参

数动态变化判断PLL是否同步，以及双馈风机是否暂态失稳。通过对3台双馈风机比较来看，G10波动最大，如图8a、b所示，G10的锁相环角度和角频率波动幅度相对于G3、G4较大，但最终会恢复到原始状态。在故障切除之后，锁相环角度逐渐恢复至 1° ，角频率恢复到1 (pu)。如图8c所示，G3、G4、G10的 q 轴电压幅值在经过一定的振荡也恢复至原始状态0。PLL的锁相同步控制恢复至初始状态，3台双馈风机接入电网的PLL均锁相成功，实现再同步。

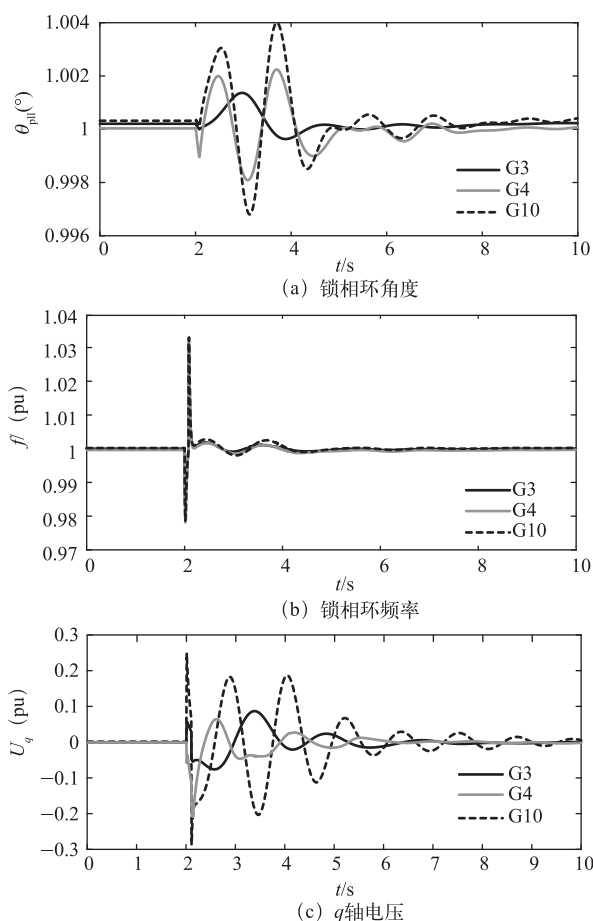


图8 在 $t=2.25$ s时切除故障的PLL变化曲线

Fig.8 At $t=2.25$ s, the PLL curve of the fault was removed

根据PMU采集到故障持续时间为225 ms的各个发电机和DFIG并网侧的端电压曲线如图9a所示，利用MLE对所采集到的电压数据进行暂态稳定分析，各并网侧的MLE均小于0，均未过零点，电压保持稳定。说明双馈风机接入IEEE 10机39节点系统，在经历一定时间的扰动之后，实

现锁相同步，双馈风电场内暂态稳定。MLE如图9b所示。

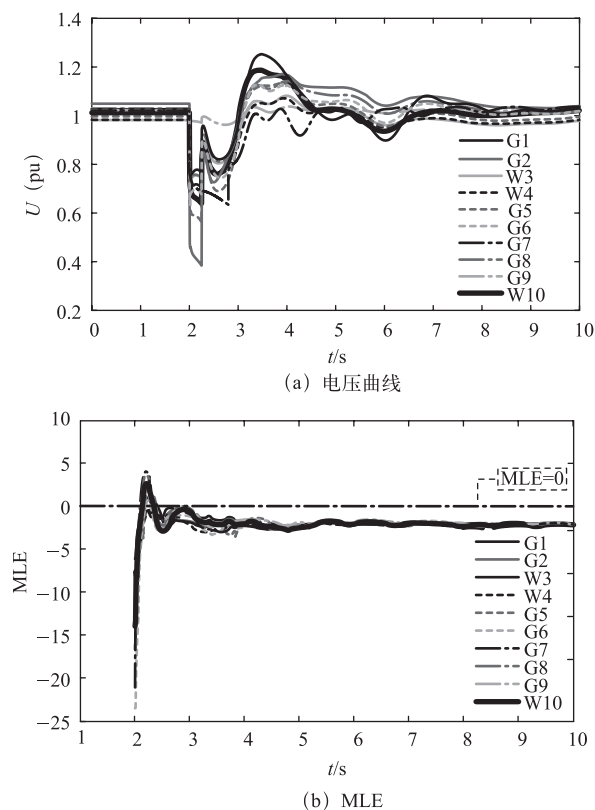


图9 暂态电压稳定的节点电压和MLE

Fig. 9 Voltage curves and MLE for transient voltage stability

总之，在经过225 ms的暂态扰动之后，PLL的参数恢复正常，3台双馈风机的PLL全部实现再同步，锁相成功，双馈风电场内实现暂态同步稳定。

4.2 在 $t=2.26$ s切除故障

在 $t=2$ s时设置三相短路故障，在 $t=2.26$ s时切除三相短路故障，故障持续时间为226ms。在这段故障时间内，如图10a、b所示，G3、G4经过较大的波动之后可以恢复至初始平衡状态，在故障切除之后，锁相环角度逐渐恢复至 1° ，角频率恢复到1 (pu)；G10在三相短路后锁相环角度急剧增大，在切除故障之后无法恢复至初始状态。如图10c所示，G3、G4的 q 轴电压幅值在经过一定的振荡后也恢复至原始状态0，G10的 q 轴电压持续波动。上述情况说明在 $t=2.26$ s时切除故障，G10的PLL暂态同步失稳。

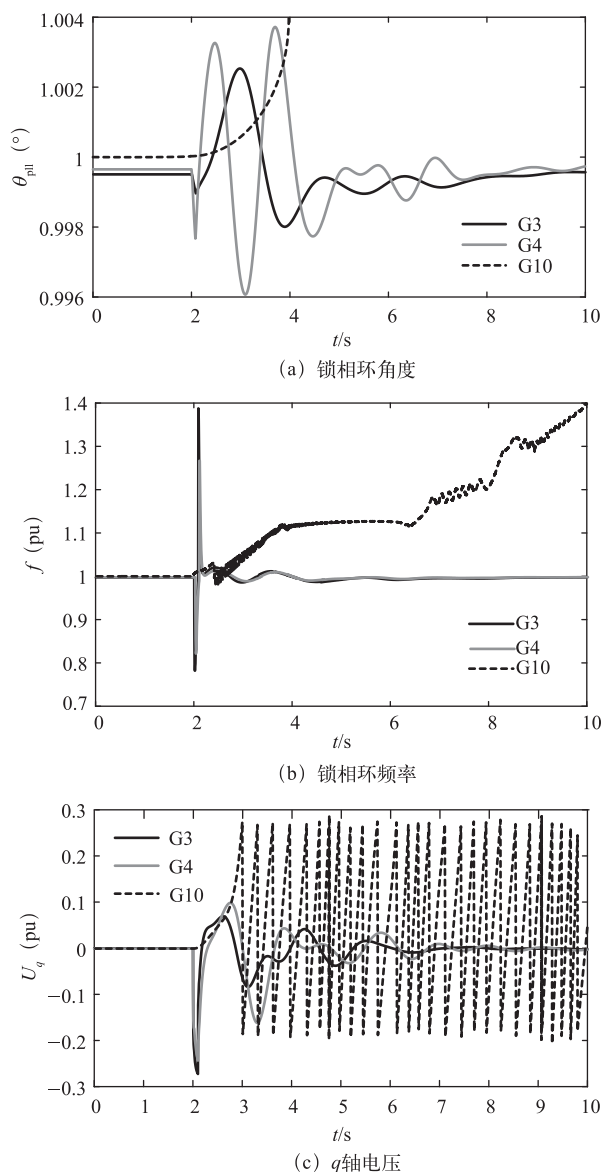


图10 在 $t=2.26$ s时切除故障的PLL变化曲线

Fig. 10 At $t=2.26$ s, the PLL curve of the fault was removed

根据PMU采集到故障持续时间为226 ms的各个发电机和DFIG并网侧的端电压曲线如图11a所示，双馈风机并网侧电压一直在持续波动，利用MLE对所采集到的电压数据进行暂态稳定分析，其结果如图11b所示，双馈风机G10网侧电压一直在持续波动，图11b中其MLE大于0，过零点，即暂态失稳。其余DFIG和发电机并网侧的MLE均小于0，均未过零点。说明双馈风机接入IEEE 10机39节点系统，在经历一定时间的扰动之后，锁相不同步，双馈风电场内暂态同步失稳。

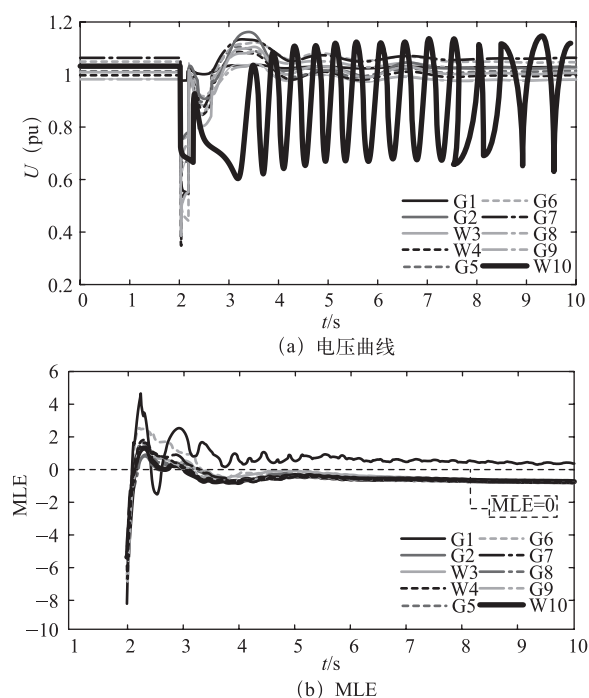


图 11 暂态电压失稳的节点电压和 MLE

Fig. 11 Voltage curves and MLE for transient voltage instability

总之，在经过226 ms的暂态扰动之后，G10的PLL参数持续波动，PLL不再实现再同步，锁相不成功，并网侧电压失稳，双馈风力发电场暂态同步失稳。

5 结束语

本文利用一种基于电压指标的暂态同步稳定性方法——最大李雅普诺夫指数法（MLE），对双馈风机接入电网的暂态稳定性进行了分析，得出以下结论：锁相环（PLL）作为双馈风机和电网同步的关键性元件，随着故障时间的延长造成锁相失败，在电网侧也会产生一系列的影响，通过MLE判断PMU所采集的电压，相较于利用等面积法和能量函数法较为直观和方便，同时为未来大规模风电接入电力系统的暂态同步稳定性提供了一定的基础。

参考文献

[1] Ömer Göksoy, Remus Teodorescu, Claus Leth Bak, et al. Instability of wind turbine converters during current injection to low voltage grid faults

and PLL frequency based stability solution[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1683-1691.

- [2] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154, 5395.
- [3] 陈诗玥. 基于锁相同步的双馈风电并网系统暂态稳定分析及其控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [4] 汪雅静. 双馈风机机电暂态特性建模与分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [5] CHENG H J, SHUAI Z K, SHEN C, et al. Transient angle stability of paralleled synchronous and virtual synchronous generators in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8751-8765.
- [6] 宋国杰, 李国进, 杨浩, 等. 基于李雅普诺夫函数的微电网下网逆变器的自适应控制[J]. 高电压技术, 2020, 46(12): 4455-4463.
- [7] TIAN Z, TANG Y J, ZHA X M, et al. Hamilton-based stability criterion and attraction region estimation for grid-tied inverters under large-signal disturbances[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(1): 413-423.
- [8] 刘俊磊, 曹娜, 钱峰, 等. 考虑双馈风电机组变流器控制参数风电场内机组振荡分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 42-49.
- [9] 户心宇. 基于换流器平均模型的直驱式风机并网电力系统暂态稳定分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2022.

作者简介

李晓（1999—），男，硕士研究生，研究方向为电力系统稳定分析与控制。

王丽馨（1991—），女，博士，副教授，硕士生导师，研究方向为电力系统稳定分析与控制。

（收稿日期：2024-01-04）