

基于实时阻抗辨识的跟网型变换器同步稳定性量化评估方法

蒋哲^{1,2}, 田浩^{1,2}, 朱元振^{1,2}, 邢法财^{1,2}, 王延团³, 叶华^{3*}, 牟倩颖³

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003; 2. 山东省智能电网技术创新中心, 山东 济南 250003; 3. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要:针对跟网型变换器同步稳定性量化评估通常模拟电网电压跌落故障但未考虑短路故障, 导致电网等效阻抗变化的问题, 提出基于实时阻抗辨识的跟网型变换器同步稳定性量化评估方法。基于所建立的跟网型变换器并网系统同步稳定分析模型, 说明电网等效阻抗对系统的同步稳定性有重要影响。考虑故障期间电网等效阻抗的变化, 提出一种实时阻抗辨识方法, 以迅速、准确地辨识出电网的等效阻抗。将实时阻抗辨识结果应用于构造的李雅普诺夫函数, 对跟网型变换器的同步稳定性进行量化评估。在 MATLAB/Simulink 中进行仿真分析, 对发生短路故障时跟网型变换器并网系统的同步稳定性进行量化评估, 验证了该方法的正确性与有效性。

关键词:跟网型变换器; 同步稳定性; 阻抗辨识; 等效阻抗; 李雅普诺夫函数

中图分类号: TM712

文献标志码: A

引用格式: 蒋哲, 田浩, 朱元振, 等. 基于实时阻抗辨识的跟网型变换器同步稳定性量化评估方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(6): 139-146.

JIANG Zhe, TIAN Hao, ZHU Yuanzhen, et al. Quantitative evaluation method for synchronous stability of the grid following converter based on real-time impedance identification[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(6): 139-146.

Quantitative evaluation method for synchronous stability of the grid following converter based on real-time impedance identification

JIANG Zhe^{1,2}, TIAN Hao^{1,2}, ZHU Yuanzhen^{1,2}, XING Facai^{1,2}, WANG Yantuan³, YE Hua^{3*}, MU Qianying³

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, Shandong, China; 2. Shandong Smart Grid Technology Innovation Center, Jinan 250003, Shandong, China; 3. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: To solve the problems that the quantitative evaluation for synchronous stability of the grid following converter was usually simulated by grid voltage sag faults, but the variation in the grid equivalent impedance caused by short circuit faults was not considered, a quantitative evaluation method for synchronous stability of the grid following converter based on real-time impedance identification was proposed. The significance of grid equivalent impedance on system stability was demonstrated using an established model for synchronous stability analysis of the grid connected system with a grid following converter. To account for variations in the grid equivalent impedance during fault conditions, a real-time impedance identification method was employed to quickly and accurately identify it. The identified impedance was then utilized to construct a Lyapunov function for quantitatively evaluating synchronous stability. Simulation analysis using MATLAB/Simulink was conducted to evaluate the synchronous stability of the grid following converter under short circuit faults, confirming both the correctness and effectiveness of the proposed method.

Keywords: grid following converter; synchronization stability; impedance identification; equivalent impedance; Lyapunov function

收稿日期: 2023-11-06

基金项目: 国网山东省电力公司科技资助项目(520626220012)

第一作者简介: 蒋哲(1985—), 男, 山东淄博人, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为电力系统优化调度。E-mail: jiangzhe1985@qq.com

* 通信作者简介: 叶华(1981—), 男, 湖北随州人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制。

E-mail: yehua@email.sdu.edu.cn

0 引言

随着新能源发电的占比增加,电力电子装备大规模应用,电压源型变换器(voltage source converter, VSC)在新型电力系统中的占比快速攀升,现代电力系统特性和动态行为发生根本性改变^[1-3]。传统电力系统的同步稳定性由发电机的功角主导,已有比较成熟的理论体系^[4]。目前实际运行的VSC几乎都是跟网型变换器,通过锁相环(phase locked loop, PLL)同步并网^[5-6]。与同步发电机不同,导致跟网型变换器同步失稳的主要因素是电网故障时PLL的动态特性受到损坏,无法实时跟踪电网电压^[7]。跟网型变换器的抗扰能力非常重要^[8],并网导则要求跟网型变换器在故障穿越期间保持同步并网运行^[9]。因此,研究故障影响下跟网型变换器并网系统的同步稳定性具有重要意义。

已有研究表明,电网的等效阻抗对跟网型变换器的同步稳定性有重要影响^[10],跟网型变换器并网系统同步稳定性评估需要详细的阻抗参数,要求对电网的等效阻抗进行迅速、准确地辨识^[11]。短路故障会导致电网的拓扑结构改变,电网的等效阻抗随之变化,在此场景下更需要阻抗辨识。传统的跟网型变换器同步稳定性量化评估通常直接给定电网在故障期间的跌落电压,未考虑故障导致电网等效阻抗的变化。

已有研究中,跟网型变换器并网系统的同步稳定性分析方法主要有等面积法(equal area criterion, EAC)、相平面法、李雅普诺夫函数法等。文献[12-13]类比同步发电机的同步稳定性分析方法,应用EAC评估跟网型变换器并网系统的同步稳定性;文献[14]通过EAC研究快速电流控制对同步稳定性的影响。与同步发电机不同的是,PLL的控制环节会引入一个不定阻尼项,该阻尼可能为负数,忽略会导致评估结果过于乐观^[15]。因此,直接采用传统的EAC评估跟网型变换器并网系统的同步稳定性是不合适的。文献[16]采取的相平面法是评估非线性系统稳定性的有效方法。但相平面法无法得到同步稳定性的定量判据,且依赖大量的数值仿真以获得系统轨迹^[17]。文献[18-20]采用直接法构造系统的李雅普诺夫函数,通过研究所构造函数的临界等位面对系统的同步稳定性进行评估。事实上,EAC和李雅普诺夫函数法均体现了直接法的思想,直接法也是目前量化评估跟网型变换器并网系统同步稳定性最有效的方法。

为解决短路故障导致电网等效阻抗发生变化时跟网型变换器的同步稳定性量化评估问题,本研究建立跟网型变换器并网系统的同步稳定模型,考虑故障导致电网等效阻抗的变化,采用实时阻抗辨识方法获得必要的电网等效阻抗参数,构造李雅普诺夫函数进行量化评估,通过仿真分析验证本研究方法的正确性与有效性。

1 跟网型变换器并网系统的同步稳定模型

1.1 交流电路的数学模型

跟网型变换器并网系统结构图如图1所示。直流电压 U_{dc} 保持恒定, R_c 、 L_c 分别为C点至公共耦合点(point of common coupling, PCC)的等效电阻和电感, i_c 为变换器的输出电流, R_{line} 、 L_{line} 分别为传输线路的等效电阻和电感, u_s 为无穷大母线的线电压, u_p 为PCC处的电压, u_c 为变换器的输出电压。

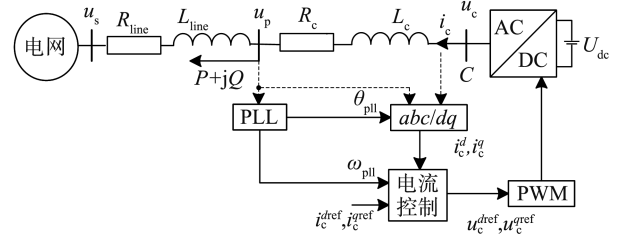


图1 跟网型变换器并网系统结构图

Fig.1 Structure of the grid connected system with a grid following converter

跟网型变换器并网系统的控制系统主要包括PLL、外环功率控制和内环电流控制。PLL跟踪PCC处的电压, θ_{pll} 和 ω_{pll} 分别为输出的相角和频率,外环功率控制的输出信号 i_c^{dref} 、 i_c^{qref} 作为内环电流控制的指令值,内环电流控制使输出电流跟踪指令值。最终,输出信号 u_c^{dref} 、 u_c^{qref} 经过脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)得到 u_c 。

根据图1得出 abc 坐标系下电路的动态方程为:

$$u_p^{abc} - u_s^{abc} = R_{line} i_c^{abc} + L_{line} \frac{di_c^{abc}}{dt}, \quad (1)$$

式中, u_p^{abc} 为 abc 坐标系下PCC处的电压, u_s^{abc} 为 abc 坐标系下无穷大母线处的电压, i_c^{abc} 为 abc 坐标系下变换器的输出电流, t 为时间。

矢量空间中不同坐标系间的关系如图2所示。 xOy 坐标系跟随 u_s^{abc} 以角速度 ω_s 旋转, dq 坐标系跟随 u_p^{abc} 以角速度 ω 旋转。 d 轴超前 x 轴的角定义为 δ 。

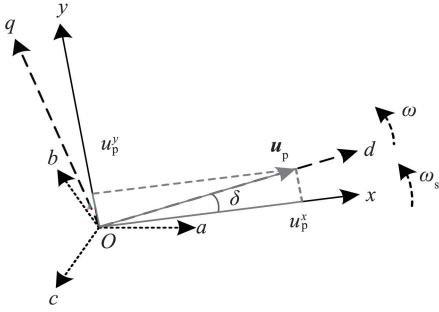


图2 矢量空间中不同坐标系间的关系

Fig.2 Relationships of different frames in vector space

将式(1)变换到dq坐标系下为:

$$\begin{bmatrix} u_p^d - U_s \cos \delta \\ u_p^q + U_s \sin \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\text{line}} & -\omega L_{\text{line}} \\ \omega L_{\text{line}} & R_{\text{line}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_c^d \\ i_c^q \end{bmatrix} + L_{\text{line}} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_c^d \\ i_c^q \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, U_s 为无穷大母线处的有效线电压, u_p^d, u_p^q 分别为 PCC 处的电压在 dq 坐标系下的 d 轴分量和 q 轴分量, i_c^d, i_c^q 分别为变换器的输出电流在 dq 坐标系下的 d 轴分量和 q 轴分量。

跟网型变换器输出的有功功率 P 和无功功率 Q 为:

$$\begin{cases} P = u_p^d i_c^d + u_p^q i_c^q \\ Q = u_p^q i_c^d - u_p^d i_c^q \end{cases} \quad (3)$$

1.2 PLL 数学模型

忽略内、外环的动态,分析 PLL 对系统同步稳定性的影响^[21]。常用的 PLL 模型如图 3 所示。

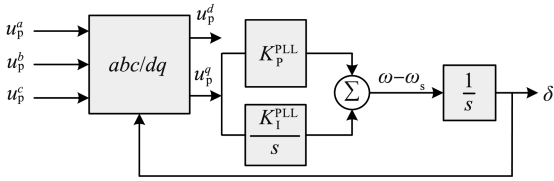


图3 PLL 模型

Fig.3 Model of PLL

PLL 的动态方程为:

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \\ \frac{d\bar{\omega}}{dt} = K_I^{\text{PLL}} u_p^q + K_P^{\text{PLL}} \frac{du_p^q}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\bar{\omega}$ 为 PLL 输出的角速度, $\bar{\omega} = \omega - \omega_s$; $K_P^{\text{PLL}}, K_I^{\text{PLL}}$ 分别为 PLL 的比例和积分系数。

1.3 系统的稳态值计算

稳态时系统运行在平衡点处,式(4)中所有微分项为 0,即:

$$\begin{cases} u_p^q(0) = 0 \\ \omega(0) = \omega_s \end{cases}, \quad (5)$$

式中下标(0)表示稳态值。联立式(2)(3)(5),整

理可得:

$$\begin{aligned} & [R_{\text{line}} P_{\text{ref}} + \omega_s L_{\text{line}} Q_{\text{ref}} + (\omega_s L_{\text{line}} P_{\text{ref}} - R_{\text{line}} Q_{\text{ref}})^2] (i_{c(0)}^d)^4 - \\ & P_{\text{ref}}^2 [U_s^2 + 2(R_{\text{line}} P_{\text{ref}} + \omega_s L_{\text{line}} Q_{\text{ref}})] (i_{c(0)}^d)^2 + P_{\text{ref}}^4 = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

式中, P_{ref} 和 Q_{ref} 分别为变换器输出的参考有功功率和参考无功功率。根据式(6)可以求解恒定功率控制下变流器输出电流的 d 轴分量稳态电流 $i_{c(0)}^d$ 和 q 轴分量稳态电流 $i_{c(0)}^q$, 其余参数的初始值也可通过式(6)求得^[22]。

1.4 同步稳定的简化模型

将式(5)(6)的简化条件代入式(4),可得跟网型变换器并网系统的同步稳定简化模型为:

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \bar{\omega} \\ M \frac{d\bar{\omega}}{dt} = C - U_s \sin \delta - D(\delta) \bar{\omega} \end{cases}, \quad (7)$$

式中: C 为等效机械转矩, $C = \omega_s L_{\text{line}} i_{c(0)}^d + R_{\text{line}} i_{c(0)}^q$; $U_s \sin \delta$ 为等效电磁转矩; M 为等效惯性系数, $M = (1 - L_{\text{line}} K_P^{\text{PLL}} i_{c(0)}^d) / K_I^{\text{PLL}}$; $D(\delta)$ 为等效阻尼系数, $D(\delta) = U_s \cos \delta K_P^{\text{PLL}} / K_I^{\text{PLL}} - L_{\text{line}} i_{c(0)}^d$ 。

式(7)描述的同步稳定模型与同步电机的转子运动方程形式类似,因此可以采用李雅普诺夫函数法量化评估其同步稳定性^[23]。

2 同步稳定性量化评估方法

2.1 实时阻抗辨识

通过跟网型变换器并网系统的同步稳定模型可以看出,电网的等效阻抗对系统的同步稳定性有重要影响。实际中,电网发生短路故障后,拓扑结构将发生改变,等效阻抗也将随之变化。本研究提出一种实时阻抗辨识方法,为跟网型变换器并网系统的同步稳定性量化评估提供必要的电网等效阻抗参数。

本研究采用基于谐波注入的实时电网等效阻抗辨识方法,主要包括以下 3 个环节:谐波注入、谐波提取和阻抗计算。

(1) 谐波注入

通过电流控制环节向系统注入频率为 f_h 的谐波,经过电网在 PCC 处产生相应频率的谐波电流与电压。

选择合适频率的注入谐波对阻抗辨识至关重要。一方面,为避开背景谐波的影响,选择非特征次谐波注入;另一方面,为减弱频率变换带来的误差,选择距基波频率较近的谐波。综合考虑,注入

谐波的频率为 75 Hz。

(2) 谐波提取

通过实时采样得到 PCC 处的电压和电流数据,利用快速傅立叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 提取分析特定频率 f_h 下的电压和电流分量。FFT 为离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT) 的改良算法,能够提升计算速度和精度,降低复杂度^[10]。

对于任何周期信号 $f(t)$, 可以用傅里叶级数表示为:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t), \quad (8)$$

式中: a_0 为周期信号 $f(t)$ 的平均分量; a_n 为 n 倍频余弦的傅里叶系数, $a_n = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t f(t) \cos(n\omega t) dt$, 其中 T 为周期, $T = 1/f_1$, f_1 为基波频率; b_n 为 n 倍频正弦的傅里叶系数, $b_n = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t f(t) \sin(n\omega t) dt$ 。

PCC 处电压和电流谐波分量的幅值 $|H_n|$ 和相位 $\angle H_n$ 分别为:

$$\begin{cases} |H_n| = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\ \angle H_n = \arctan\left(\frac{a_n}{b_n}\right) \end{cases} \quad (9)$$

(3) 阻抗计算

PCC 处的电压 $u_p(t)$ 和电流 $i_c(t)$ 的谐波分量 u_{ph} 和 i_{ph} 分别为:

$$\begin{cases} u_{ph} = F(u_p(t)) \\ i_{ph} = F(i_c(t)) \end{cases}, \quad (10)$$

式中 $F(\cdot)$ 表示采用 FFT 提取电压和电流信号中相应频率的谐波分量。

电网等效阻抗

$$Z_{\text{line}}(\omega_h) = \frac{u_{ph} - u_{ph0}}{i_{ph} - i_{ph0}} = R_{\text{line}} + jX_h, \quad (11)$$

式中, u_{ph0} 和 i_{ph0} 分别为未注入谐波时 PCC 处电网背景谐波的电压和电流分量, X_h 为电网等效电抗。

电网等效电感

$$L_{\text{line}} = X_h / \omega_h, \quad (12)$$

式中, ω_h 为特定频率 f_h 下的角速度, $\omega_h = 2\pi f_h$ 。

2.2 李雅普诺夫函数的构造

2.2.1 李雅普诺夫函数 I

常规的李雅普诺夫函数形式为系统变量的二次形式加上一个积分形式,构造的李雅普诺夫函数 I 为:

$$V(\bar{\omega}, \delta) = \frac{\bar{\omega}^2}{2} + \frac{1}{M} \int_{\delta_s}^{\delta} (U_s \sin x - C) dx, \quad (13)$$

式中, δ_s 为系统的稳定平衡点 (stable equilibrium point, SEP), $\delta_s = \arcsin(C/U_s)$ 。式(13)等号右边第一项可表示系统的动能,第二项可表示系统的势能,具有清晰的物理意义。

根据李雅普诺夫定理,得到系统状态 δ 的稳定域为:

$$-\delta_I \leq \delta \leq \delta_I, \quad (14)$$

式中, $-\delta_I$ 、 δ_I 分别为李雅普诺夫函数 I 导出稳定域的下限和上限, $\delta_I = \arccos\left(\frac{K_I^{\text{PLL}} L_{\text{line}} i_{c(0)}^d}{K_p^{\text{PLL}} U_s}\right)$ 。

2.2.2 李雅普诺夫函数 II

为更接近真实的稳定域,构造保守性更小的李雅普诺夫函数^[24]。选取新的函数构造变量

$$x_a = \frac{1}{M} \int_0^t (C - U_s \sin \delta) dt, \quad (15)$$

构造李雅普诺夫函数 II 为:

$$V(x_a, \delta) = \frac{x_a^2}{2} + \frac{1}{M} \int_{\delta_s}^{\delta} (U_s \sin x - C) dx. \quad (16)$$

根据李雅普诺夫定理,得到系统状态 δ 的稳定域为:

$$\delta_{II} \leq \delta \leq \delta_{III}, \quad (17)$$

式中, δ_{II} 、 δ_{III} 分别为李雅普诺夫函数 II 导出稳定域的下限和上限, δ_{II} 和 δ_{III} 为 $\sin \delta = \frac{K_I^{\text{PLL}} L_{\text{line}} i_{c(0)}^d}{K_p^{\text{PLL}} U_s} (\delta - \delta_s) + \sin \delta_s$ 的 2 个解。

综合比较,李雅普诺夫函数 I 的物理意义明确,且信号获取方便;李雅普诺夫函数 II 保守性更小。因此,通过李雅普诺夫函数 II 导出系统的稳定域后,采用李雅普诺夫函数 I 定义系统的能量边界并进行同步稳定性量化评估。

当系统状态 δ 在式(17)表示的区域内时,系统稳定。在此区域内, $V(\bar{\omega}, \delta)$ 在 $\bar{\omega} = 0$ 、 $\delta = \delta_{III}$ 处取得最大值,由此得到系统的能量极限

$$V_{III\max} = \frac{1}{M} \int_{\delta_s}^{\delta_{III}} (U_s \sin x - C) dx. \quad (18)$$

δ_{IV} 为系统的不稳定平衡点 (unstable equilibrium point, UEP), $\delta_{IV} = \pi - \delta_s$, 当系统的运行点越过此点时,系统失稳,此处的能量极限

$$V_{IV\max} = \frac{1}{M} \int_{\delta_s}^{\delta_{IV}} (U_s \sin x - C) dx. \quad (19)$$

当 $\delta_{III} \leq \delta \leq \delta_{IV}$ 时,系统的李雅普诺夫函数值 $V_{III\max} \leq V \leq V_{IV\max}$, 系统可能失稳。这是因为采用李雅普诺夫函数法具有一定的保守性,但该保守性是可以接受的,保守性是该类方法无法避免的问题。另外,跟网型变换器并网系统的同步稳定性

量化评估需要一定的保守性,以便为控制策略的启动和继电保护动作留出时间,并且能够避免漏判情况的发生,避免对跟网型变换器并网系统造成更大的危害。

3 仿真实验

为验证所研究的基于实时阻抗辨识的跟网型变换器同步稳定性量化评估方法的正确性和有效性,在 MATLAB/Simulink 中进行仿真试验,参数取值为:无穷大母线电压 U_g 为 220 kV,基准容量 S_B 为 200 MVA,传输线电感 L_{line} 的标么值为 0.5,传输线电阻 R_{line} 的标么值为 0.05,相电抗器电感 L_c 的标么值为 0.15,相电抗器电阻 R_c 的标么值为 0.005,电网同步角速度 ω_s 为 314 rad/s,PLL 比例系数 K_p^{PLL} 为 0.14,PLL 积分系数 K_i^{PLL} 为 100,参考有功功率 P_{ref} 为 120 MW,参考无功功率 Q_{ref} 为 0 MW。

3.1 实时阻抗辨识验证

仿真系统拓扑结构如图 4 所示,其中 Z_{11} 为电压源 AC1 到并网点的阻抗, $Z_{12}+Z_{13}$ 为电压源 AC2 到并网点的阻抗, U_{dc} 为直流侧电压, U_c 为 VSC 端口电压, U_p 为 PCC 处的电压。红色箭头处发生三相接地短路故障, R_f 为接地电阻。

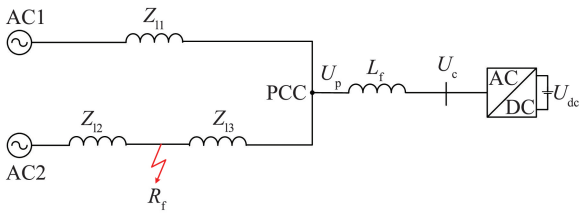


图 4 仿真系统拓扑结构
Fig.4 Simulation system topology

设置阻抗标么值 $Z_{11} = 0.2 + j0.6$, $Z_{12} = 0.1 + j0.3$, $Z_{13} = 0.1 + j0.3$,电压源电压标么值为 1。故障前系统的等效电路图如图 5 所示,其中 U_g 为电网电压。

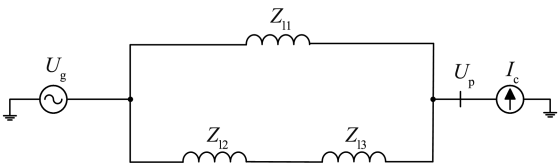


图 5 故障前系统的等效电路图
Fig.5 Equivalent circuit diagram before fault

由图 5 可得,故障前电网理论等效阻抗

$$Z_{TE} = \frac{Z_{11} \times (Z_{12} + Z_{13})}{Z_{11} + (Z_{12} + Z_{13})} = 0.1 + j0.3。 \quad (20)$$

$t=2$ s 时,图 4 中红色箭头所示位置发生三相

接地短路故障,接地电阻标么值 $R_f = 0.01$,系统的等效电路图如图 6 所示。

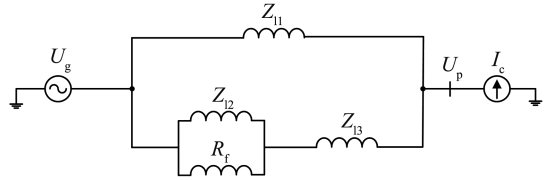


图 6 故障期间系统的等效电路图
Fig.6 Equivalent circuit diagram during fault

由图 6 可得,故障期间电网理论等效阻抗

$$Z_{TEf} = \frac{Z_{11} \times \left(\frac{Z_{12} \times R_f}{Z_{12} + R_f} + Z_{13} \right)}{Z_{11} + \left(\frac{Z_{12} \times R_f}{Z_{12} + R_f} + Z_{13} \right)} = 0.0711 + j0.2。 \quad (21)$$

本研究采用的实时阻抗辨识方法得到的等效电阻、等效电抗分别如图 7、8 所示。辨识得到故障前等效阻抗标么值为 $0.1000 + j0.3000$,故障期间等效阻抗标么值为 $0.0709 + j0.2000$,与理论值一致。

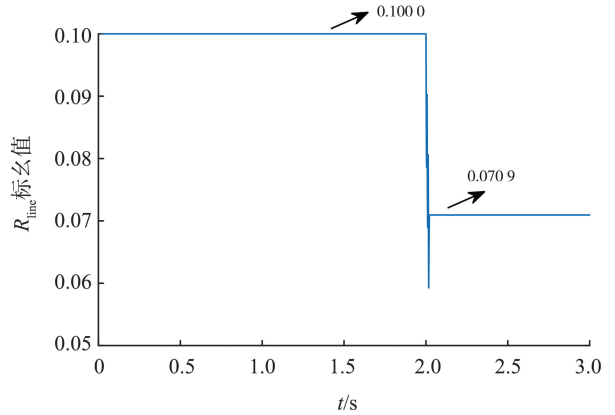


图 7 等效电阻辨识结果
Fig.7 Equivalent resistance identification result

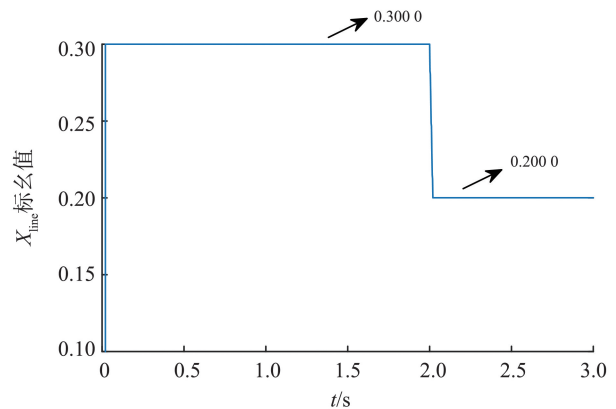


图 8 等效电抗辨识结果
Fig.8 Equivalent inductance identification result

仿真结果表明,本研究采用的实时阻抗辨识方法能够在 20 ms 内迅速、准确地辨识出电网的等效阻抗,满足跟网型变换器同步稳定性量化评估的

要求。

3.2 李雅普诺夫函数有效性验证

PLL 的参数对系统稳定域的影响如图 9 所示, 增大 PLL 的比例系数或减小积分系数, 都能增大稳定域。由图 9 也可以看出, 无论 PLL 的比例系数或积分系数如何变化, 李雅普诺夫函数 II 导出的稳定域始终在李雅普诺夫函数 I 的上方, 验证了李雅普诺夫函数 II 的保守性更小。

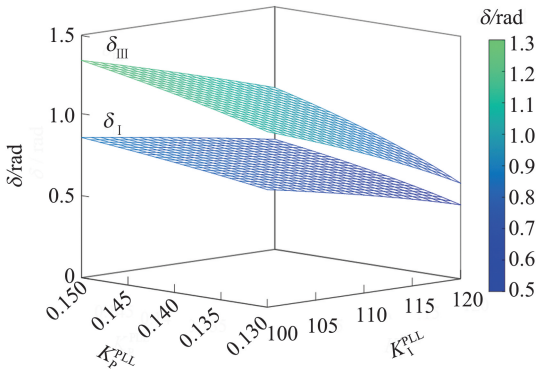


图9 PLL 的参数对系统稳定域的影响

Fig.9 Influence of PLL parameters on stable regions

3.3 同步稳定性量化评估方法验证

为验证所研究的跟网型变换器同步稳定性量化评估方法的正确性和有效性, 对图 1 中跟网型变换器并网系统发生三相接地短路故障的情况进行仿真试验。经实时阻抗辨识得到电网的等效阻抗, 为李雅普诺夫函数 V 的计算提供必要的阻抗参数。计算得到任意时刻的 V 与临界能量进行比较, 量化评估系统在任意时刻的同步稳定性。

根据本研究选取的跟网型变换器并网系统参数, 计算得到系统和李雅普诺夫函数的极限值如表 1 所示。

表1 系统和李雅普诺夫函数的极限值

Table 1 Limit values for system and Lyapunov function

δ_s/rad	极限值		
	δ_{III}/rad	$V_{III\max}$	$V_{IV\max}$
0.310 4	1.225 4	7 718	25 727

场景一为 $t=2\text{ s}$ 时在距电网 80% 处的传输线路发生三相接地短路故障, 接地电阻标幺值 $R_f=0.01$, 60 ms 后故障清除。场景一的李雅普诺夫函数 V 的变化过程如图 10 所示, 最终超过临界能量 $V_{IV\max}$, 系统发生同步失稳。

场景二与场景一相比仅故障清除时间改变, 40 ms 后故障清除。场景二的李雅普诺夫函数 V 的变化过程如图 11 所示, 始终未超过临界能量 $V_{III\max}$, 系统保持同步稳定。

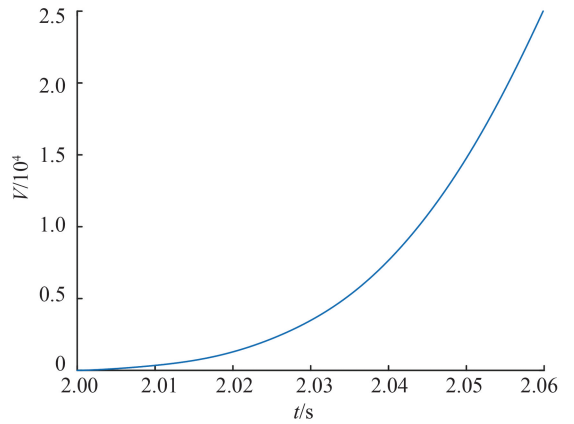


图 10 场景一的李雅普诺夫函数值

Fig.10 Lyapunov function values in scenario one

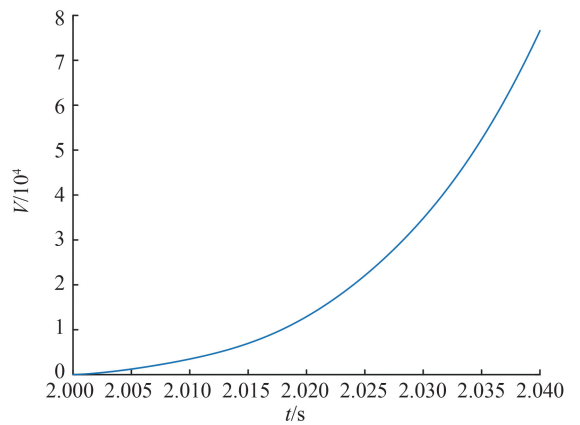


图 11 场景二的李雅普诺夫函数值

Fig.11 Lyapunov function values in scenario two

2 种场景的相平面图如图 12 所示。故障切除时间 $t_c=40\text{ ms}$ 时, 即在 A 点故障切除, 运行点沿蓝色曲线运行, 最终回到 SEP, 系统稳定, 验证了本研究推导的稳定域的正确性; 故障切除时间 $t_c=60\text{ ms}$ 时, 即在 B 点故障切除, 运行点沿红色曲线逐渐偏离 SEP, 最终越过 UEP, 系统失稳。综合以上仿真结果与分析, 证明本研究的基于实时阻抗辨识的跟网型变换器同步稳定性量化评估方法具有正确性与有效性。

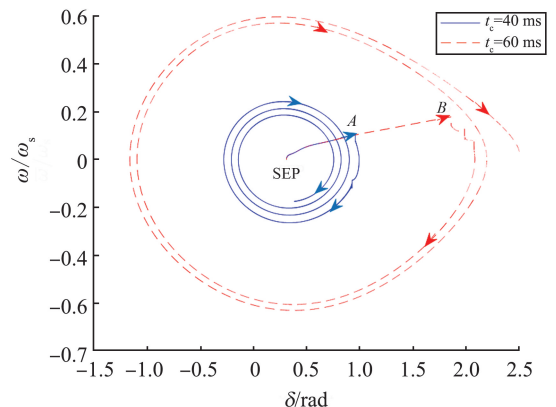


图 12 2 种场景的相平面图

Fig.12 Phase plane in two scenarios

4 结论

目前跟网型变换器同步稳定性研究通常直接给定电网侧故障后的跌落电压,未考虑短路故障导致电网等效阻抗发生变化的情形。为此,本研究提出基于实时阻抗辨识的跟网型变换器同步稳定性量化评估方法,以分析跟网型变换器并网系统实际发生短路故障的同步稳定性,所得结论如下。

(1)跟网型变换器并网系统发生短路故障,系统拓扑结构发生改变,影响电网的等效阻抗。本研究采用的实时阻抗辨识方法可以迅速、准确地辨识出电网的等效阻抗。

(2)构造保守性更小的李雅普诺夫函数,能够有效量化评估系统的同步稳定性。李雅普诺夫函数法也是目前量化评估跟网型变换器同步稳定性最有效的方法。

基于本研究的工作,后续可以研究多机互联系统的同步稳定性问题,以期进一步在实际工程中应用。

参考文献:

- [1] 张宇,蔡旭,张琛,等. 并网变换器的暂态同步稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1687-1702.
ZHANG Yu, CAI Xu, ZHANG Chen, et al. Transient synchronization stability analysis of voltage source converters: a review [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1687-1702.
- [2] 邢法财,徐政,王世佳. 非同步机电源接入电网后的谐振问题分析及抑制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 71-79.
XING Facai, XU Zheng, WANG Shijia. Analysis and suppression of resonance problem in power system with unconventional generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 71-79.
- [3] 张恒旭,高志民,曹永吉,等. 高比例可再生能源接入下电力系统惯量研究综述及展望[J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(5): 1-13.
ZHANG Hengxu, GAO Zhimin, CAO Yongji, et al. Review and prospect of research on power system inertia with high penetration of renewable energy source [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2022, 52(5): 1-13.
- [4] KUNDUR P, PASERBA J, AJJARAPU V, et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1387-1401.
- [5] 谢才科,姜自民,刘玉田,等. 海上风电机组低电压穿越远端检测[J]. 山东大学学报(工学版), 2017, 47(4): 110-116.
XIE Caike, JIANG Ziming, LIU Yutian, et al. Remote testing on low voltage ride through of offshore wind turbines [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2017, 47(4): 110-116.
- [6] 徐永海,何志轩,董旭,等. 基于DG和多端VSC协调控制的交直流配电网优化运行[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 116-123.
XU Yonghai, HE Zhixuan, DONG Xu, et al. Optimal operation of AC/DC distribution network based on DG and multi-terminal VSC coordinated control [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 116-123.
- [7] 张琛,蔡旭,李征. 电压源型并网逆变器的机-网电气振荡机理及稳定判据研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3174-3183.
ZHANG Chen, CAI Xu, LI Zheng. Stability criterion and mechanisms analysis of electrical oscillations in the grid-tied VSC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3174-3183.
- [8] 杨霞,李琛,杨路勇,等. 风电并网逆变器的双闭环自抗扰控制策略研究[J]. 山东电力技术, 2022, 49(11): 70-77.
YANG Xia, LI Chen, YANG Luyong, et al. Research on double closed-loop active disturbance rejection control strategy of wind power grid-connected inverter [J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(11): 70-77.
- [9] HE X, GENG H, XI J, et al. Resynchronization analysis and improvement of grid-connected VSCs during grid faults [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 9(1): 438-450.
- [10] CESPEDES M, SUN J. Online grid impedance identification for adaptive control of grid-connected inverters [C]//2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Raleigh, USA: IEEE, 2012: 914-921.
- [11] PENG L, LI Y, MILI L, et al. A real-time enhanced Thevenin equivalent parameter estimation method for PLL synchronization stability control in VSC [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 37(4): 2650-2660.
- [12] 张琛,蔡旭,李征. 全功率变换风电机组的暂态稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4018-4026.
ZHANG Chen, CAI Xu, LI Zheng. Transient stability analysis of wind turbines with full-scale voltage source converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14):

4018-4026.

- [13] ZHANG C, MOLINAS M, LI Z, et al. Synchronizing stability analysis and region of attraction estimation of grid-feeding VSCs using sum-of-squares programming [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2020, 8: 1-12.
- [14] HU Q, FU L, MA F, et al. Analogized synchronous-generator model of PLL-based VSC and transient synchronizing stability of converter dominated power system[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(2): 1174-1185.
- [15] 翁华, 朱维骏, 李宇骏, 等. 并网 CIG 系统的小干扰稳定性解析分析[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2023, 53(4): 128-139.
- WENG Hua, ZHU Weijun, LI Yujun, et al. Analytical analysis of small disturbance stability of grid-connected CIG system[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2023, 53(4): 128-139.
- [16] WU H, WANG X. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage-source converters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 35(4): 3573-3589.
- [17] TAUL M G, WANG X, DAVARI P, et al. An overview of assessment methods for synchronization stability of grid-connected converters under severe symmetrical grid faults[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(10): 9655-9670.
- [18] TIAN Z, TANG Y, ZHA X, 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*, 2021, 10(1): 413-423.
- [19] MANSOUR M Z, ME S P, HADAVI S, et al.

Nonlinear transient stability analysis of phased-locked loop-based grid-following voltage-source converters using Lyapunov's direct method [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 10(3): 2699-2709.

- [20] FU X, SUN J, HUANG M, et al. Large-signal stability of grid-forming and grid-following controls in voltage source converter: a comparative study[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 36(7): 7832-7840.
- [21] MORRIS J F, AHMED K H, EGEA-ALVAREZ A. Analysis of controller bandwidth interactions for vector controlled VSC connected to very weak AC grids[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(6): 7343-7354.
- [22] HU Q, FU L, MA F, et al. Large signal synchronizing instability of PLL-based VSC connected to weak AC grid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(4): 3220-3229.
- [23] 李宇骏, 华凤林, 陆艺源, 等. 基于李雅普诺夫函数的带锁相环的 VSC 大扰动稳定性判据[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(2): 46-54.
- LI Yujun, HUA Fenglin, LU Yiyuan, et al. Large disturbance stability criterion for a VSC with phase-locked loop based on a Lyapunov function [J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(2): 46-54.
- [24] TANG Y, LI Y. Common Lyapunov function based stability analysis of VSC with limits of phase locked loop [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(2): 1759-1762.

(编辑:孙亚彤)

(上接第 138 页)

- [13] 张友鹏, 张宸瑞, 赵珊鹏, 等. 兰新高铁大风区段接触网正馈线斜拉绝缘子防舞有效性分析[J]. *高压技术*, 2020, 46(11): 3905-3913.
- ZHANG Youpeng, ZHANG Chenrui, ZHAO Shanpeng, et al. Anti-galloping effectiveness analysis of positive feeder cable-stayed insulator of catenary in strong wind area of Lanzhou-Urumqi high-speed railway [J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(11): 3905-3913.
- [14] 雷娟棉, 谭朝明. 基于 Transition SST 模型的高雷诺数圆柱绕流数值研究 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, 43(2): 207-217.
- LEI Juanmian, TAN Zhaoming. Numerical simulation for flow around circular cylinder at high Reynolds number based on Transition SST model [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*,

2017, 43(2): 207-217.

- [15] 谢献忠, 刘赛, 王文军, 等. 输电线脱冰动荷特性试验 [J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 34(1): 70-76.
- XIE Xianzhong, LIU Sai, WANG Wenjun, et al. Experiment study on the properties of dynamic load of power transmission line induced by ice shedding [J]. *Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 34(1): 70-76.
- [16] 崔伟, 严波, 杨晓辉, 等. 双分裂导线间隔棒防舞数值模拟研究 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33(20): 47-51.
- CUI Wei, YAN Bo, YANG Xiaohui, et al. Numerical investigation on anti-galloping of double bundle conductors with interphase spacers [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(20): 47-51.

(编辑:孙亚彤)