

引用格式:袁梦瞳,薄耀龙,夏杨红,等.并网变流器小信号稳定性解析解[J].电力科学与技术学报,2024,39(4):234-244.

Citation: YUAN Mengtong, BO Yaolong, XIA Yanghong, et al. Analytical solution for small signal stability of grid-connected converter[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 234-244.

并网变流器小信号稳定性解析解

袁梦瞳¹, 薄耀龙¹, 夏杨红¹, 韦巍¹, 朱承治²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要:锁相环(phase-locked loop, PLL)是变流器并网同步的核心环节,现有技术通常采用基于同步坐标系的锁相环(synchronous reference frame-PLL, SRF-PLL)。由于SRF-PLL的引入,使得并网变流器模型复杂,稳定性分析困难,通常结合波特图等进行数值验证分析而难以获得解析解,更多关于稳定性的本质机理无法有效揭示。因此,提出一种基于代数运算的锁相(algebraic operation based PLL, AO-PLL)控制技术,同步速度更快,且在该锁相控制方式下,变流器模型阶次降低。基于此,给出系统稳定性的封闭解析解形式,并获得系统稳定性的充要条件,在此基础上,分析有功无功控制耦合对系统稳定性影响;揭示电流环比例控制器和积分控制器对系统稳定性的不同影响机理;解释利用短路比来刻画系统稳定裕度的内涵。此外,阐述所提AO-PLL和常规SRF-PLL之间的内在联系,以及稳定性结论在常规SRF-PLL控制下的适用性。最后通过算例验证前述理论分析的正确性。

关键词:锁相环;并网变流器;有功无功耦合;小信号稳定性;弱电网

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.04.026 **中图分类号:** TM712 **文章编号:** 1673-9140(2024)04-0234-11

Analytical solution for small signal stability of grid-connected converter

YUAN Mengtong¹, BO Yaolong¹, XIA Yanghong¹, WEI Wei¹, ZHU Chengzhi²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

Abstract: The phase-locked loop (PLL) is a core component for grid synchronization of power converters. Existing technologies commonly employ the PLL based on the synchronous reference frame (SRF-PLL). The introduction of SRF-PLL complicates the model of grid-connected converters and makes stability analysis challenging. Typically, numerical verification analysis is conducted using Bode plots, making it difficult to obtain analytical solutions and effectively reveal the underlying mechanisms of stability. Therefore, an algebraic operation-based PLL (AO-PLL) control technology is proposed, which offers faster synchronization and reduces the order of the converter model under this PLL control mode. Based on this, a closed-form analytical solution for system stability is presented, and necessary and sufficient conditions for system stability are obtained. On this basis, the impact of active and reactive power control coupling on system stability is analyzed; the different mechanisms of the proportional controller and integral controller of the current loop on system stability are revealed; and the connotation of using short-circuit ratio to describe the system stability margin is explained. Furthermore, the intrinsic relationship between the proposed AO-PLL and the conventional SRF-PLL is elaborated, as well as the applicability of stability conclusions under conventional SRF-PLL control. Finally, numerical examples are provided to verify the correctness of the aforementioned theoretical analysis.

Key words: phase-locked loop; grid-connected converter; coupling of active and reactive power; small signal stability; weak grid

光伏、风机等新能源通过电力电子变流器接入大电网进行发电,因此,以新能源为主体的新型电

力系统电力电子化趋势明显。相比于以同步机为主导的传统电力系统,电力电子化电力系统的主要

收稿日期:2023-08-28;修回日期:2024-03-19

基金项目:浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划(2023C01126)

通信作者:夏杨红(1991—),男,博士,浙江大学特聘研究员,主要从事分布式发电、可再生能源电解制氢的研究;E-mail:royxiayh@zju.edu.com

特征已经发生深刻的改变,系统稳定性问题逐渐突出^[1-4]。尤其在弱电网情形下,宽频带振荡^[5-9]、谐波谐振^[10-14]等事故频发,近年来吸引了国内外诸多学者关注。

锁相环(phase-locked loop, PLL)作为变流器并网同步的核心环节,对变流器的稳定性起到关键作用,在不同的锁相方法中,基于同步坐标系的锁相环(synchronous reference frame-PLL, SRF-PLL)得到了广泛应用,因此,现有的文献集中对基于SRF-PLL的并网变流器进行稳定性分析。文献[15-18]着重分析了控制延时、弱电网阻抗与变流器LCL滤波器之间相互作用而引发的高频谐振问题;借鉴直流系统馈入交流系统时的评价系统稳定性短路比概念,文献[19-21]提出了广义短路比概念,用以分析变流器接入弱电网稳定性;文献[22]采用了阻抗稳定性分析法,有效评估了变流器接入弱电网的稳定性;文献[23-25]构建了并网变流器dq轴阻抗模型,指出PLL导致q轴阻抗在低频段呈现负阻尼特性;文献[26-27]进一步对阻抗分析法在判断系统稳定性、探究系统振荡方面的应用进行阐述;文献[28-30]指出在弱电网下,随着PLL带宽增大,变流器谐振风险增加;文献[31-32]则着重分析了无功控制对并网变流器稳定性的影响;文献[33-35]建立了多机并网阻抗模型,讨论了多机耦合、网络串补等对并网变流器稳定性影响。

由于变流器存在SRF-PLL、电流环及滤波器等多个环节,系统阶次较高,且在dq同步参考坐标系下控制,变流器模型为2×2的多入多出(multiple input multiple output, MIMO)系统。因此为简化分析,现有文献多忽略有功无功通道的耦合影响,将2×2的MIMO系统近似为2个单入单出(single input single output, SISO)系统进行分析。同时,多采用数值验证技术,结合具体案例参数,枚举若干参数变化,利用Nyquist、Bode图等手段进行稳定性趋势分析。总体上是将变流器作为飞行事故记录器进行处理,获取其外在特性,如广义阻抗^[19-21]、阻抗^[33-35]等,进而采用阻抗分析法、广义短路比等进行稳定性判别。然而,这样只能在有限空间内试探相关参数对系统整体稳定性的影响,而且对于多参数系统,无法有效评估参数间的耦合因素,如PI参数耦合影响、有功无功耦合影响等。所以在仅依靠有限数值仿真验证而缺乏封闭解析解情况下,更多关于稳定性的本质机理无法有效揭示。进一步,所得稳定性结论也无法保证变流器在更广参数空间、更

多工况下稳定运行。

为此,本文提出一种基于代数运算的锁相(algebraic operation based PLL, AO-PLL)控制技术, AO-PLL仅依赖于端口相电压的代数运算而获得Park变换及其逆变换所需的三角函数信息,是0阶系统,不引入额外的系统状态量。在该锁相控制方式下,同步过程更快且并网变流器模型阶次显著降低,成为典型的二阶系统。在此基础上,构建并网变流器MIMO模型,利用MIMO理论,给出系统稳定性的封闭解析解形式,获得系统稳定的充要条件。据此分析有功无功控制耦合对系统稳定性的影响;揭示电流环比例控制器和积分控制器对系统稳定性的不同影响机理;解释利用短路比来刻画系统稳定裕度的内涵。此外,阐述所提AO-PLL和常规SRF-PLL之间的内在联系,以及相关稳定性结论在常规SRF-PLL控制下的适用性和借鉴意义。最后,通过相关算例验证前述理论分析的正确性。

1 基于AO-PLL的并网变流器控制及建模

1.1 AO-PLL原理

由于交流电网中电压、电流等呈正弦时变变化,不利于控制器的设计。现有变流器控制常采用dq同步参考坐标系控制方法,将abc三相静止坐标系中的正弦量转变为dq坐标系下的直流量,如图1(a)所示,方便控制器的设计,其核心在于Park变换及其逆变换。

令三相量 \vec{X} 的时域表达式如下:

$$\begin{cases} x_a = X \cos \theta = X \cos(\omega t + \varphi) \\ x_b = X \cos(\theta - 2\pi/3) = X \cos(\omega t + \varphi - 2\pi/3) \\ x_c = X \cos(\theta + 2\pi/3) = X \cos(\omega t + \varphi + 2\pi/3) \end{cases} \quad (1)$$

式中, ω 为角频率; φ 为初始相位角。

在d轴定向情形下,Park变换表达式如下:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

在传统控制策略中,式(2)所需要的三角信息需要通过传统锁相环,如SRF-PLL,得到其控制流

程:输入三相信息,经过Park变换得到 dq 轴信息,通过比例积分控制器得到角频率,然后经过积分得到相角,最后通过三角运算得到三角信息。这个过程存在比例积分控制环节和积分环节,是典型的2阶系统。然而,观察式(1)、(2),Park变换所需的全部三角信息可以通过 x_a, x_b, x_c 之间的代数运算直接获得,即

$$\begin{cases} X = \sqrt{2(x_a^2 + x_b^2 + x_c^2)}/3 \\ \cos \theta = x_a/X \\ \cos(\theta - 2\pi/3) = x_b/X \\ \cos(\theta + 2\pi/3) = x_c/X \\ \sin \theta = \sqrt{3}(x_b - x_c)/3X \\ \sin(\theta - 2\pi/3) = -\sqrt{3}(2x_a + x_b)/3X \\ \sin(\theta + 2\pi/3) = \sqrt{3}(2x_a + x_c)/3X \end{cases} \quad (3)$$

因此,基于式(3),本文提出图1(b)所示的AO-PLL控制策略,AO-PLL输入 x_a, x_b, x_c ,并根据式(3)直接求出系统坐标变换所需的三角信息并输出;AO-PLL可以通过简单的代数运算获得系统坐标变换所需的全部信息,是0阶系统,相比于传统SRF-PLL的2阶系统,控制结构更为简便、响应速度更快,且只需更少的计算资源。

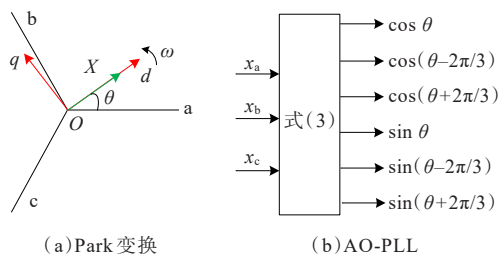


图1 基于AO-PLL的Park变换

Figure 1 Park transformation based on AO-PLL

1.2 基于AO-PLL的并网变流器建模

基于AO-PLL并网变流器的控制策略及其拓扑如图2所示, U_{dc} 为直流侧电压, u_a, u_b, u_c 为变流器输出电压, i_a, i_b, i_c 为输出电流,经电感 L 滤波后馈入交流弱电网系统。交流弱电网由戴维南等效电路近似,其中 L_g 为线路电感, u_s 为理想电压源,其三相电压用 u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} 表示, u_g 为变流器公共连接点(point of common coupling, PCC)电压,其三相电压用 u_{ga}, u_{gb}, u_{gc} 表示。

整个变流器控制是在 dq 同步参考坐标系中实现,通过所提AO-PLL策略,实现 abc 坐标系到 dq

坐标系之间的相互转换,其中 d 轴与PCC点电压相量对齐。 d 轴为有功电流通道, q 轴为无功电流通道。电流环采用PI控制器,其比例系数为 k_p ,积分系数为 k_i 。此外,为提升电流控制性能,进行了相应的解耦补偿。

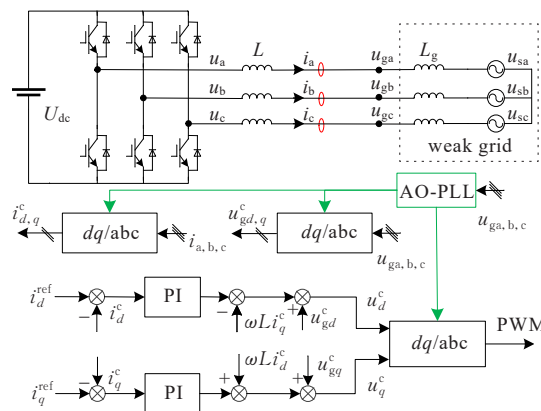


图2 基于AO-PLL的并网变流器结构

Figure 2 Structure of grid-connected converter based on AO-PLL

如图3所示,并网变流器系统含有2个 dq 轴,即系统和控制器 dq 轴^[23]。系统 dq 轴以额定角速度旋转,可在此轴中研究动态量变化,本文中系统 dq 轴中的相关变量采用上角标“s”。控制器 dq 轴是以AO-PLL观测到的角速度旋转,时刻保持着和PCC点电压对齐同步,控制器中反馈和输出的 dq 量均在此轴中定义,本文中控制器 dq 轴中的相关变量采用上角标“c”,该表示方式被广泛应用于考虑锁相环的变流器稳定性分析中^[23-25]。稳态时2个 dq 轴重合,系统受扰后这2个轴之间的夹角为 $\Delta\theta$ 。

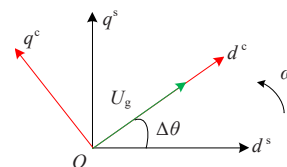


图3 系统 dq 轴和控制器 dq 轴

Figure 3 System dq axes and controller dq axes

系统 dq 轴中的状态变量 x^s 和控制器 dq 轴中的状态变量 x^c 之间的转换关系为

$$x_{d,q}^s = e^{j\Delta\theta} x_{d,q}^c \quad (4)$$

即

$$\begin{cases} x_d^s = x_d^c \cos \Delta\theta - x_q^c \sin \Delta\theta \\ x_q^s = x_q^c \cos \Delta\theta + x_d^c \sin \Delta\theta \\ x_d^c = x_d^s \cos \Delta\theta + x_q^s \sin \Delta\theta \\ x_q^c = x_q^s \cos \Delta\theta - x_d^s \sin \Delta\theta \end{cases} \quad (5)$$

结合图2和式(5),在系统 dq 轴中,并网变流器模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_d^s}{dt} = k_p [I_d^{\text{ref}} \cos \Delta\theta - I_q^{\text{ref}} \sin \Delta\theta - i_d^s] + \\ \quad S_d \cos \Delta\theta - S_q \sin \Delta\theta \\ L \frac{di_q^s}{dt} = k_p [I_q^{\text{ref}} \cos \Delta\theta + I_d^{\text{ref}} \sin \Delta\theta - i_q^s] + \\ \quad S_q \cos \Delta\theta + S_d \sin \Delta\theta \\ \frac{dS_d}{dt} = k_i [I_d^{\text{ref}} - (i_d^s \cos \Delta\theta + i_q^s \sin \Delta\theta)] \\ \frac{dS_q}{dt} = k_i [I_q^{\text{ref}} - (i_q^s \cos \Delta\theta - i_d^s \sin \Delta\theta)] \end{cases} \quad (6)$$

式中, S_d 、 S_q 分别为 d 、 q 轴积分控制器输出; i_d^s 、 i_q^s 为有功、无功电流; I_d^{ref} 、 I_q^{ref} 分别为有功、无功电流指令。

在平衡点处对式(6)系统线性化并进行Laplace变换,则有

$$\begin{cases} (Ls + k_p) \Delta i_d^s = -k_p I_q^{\text{ref}} \sin \Delta\theta + S_d \\ (Ls + k_p) \Delta i_q^s = k_p I_d^{\text{ref}} \sin \Delta\theta + S_q \\ \Delta S_d s = -k_i (\Delta i_d^s + I_q^{\text{ref}} \sin \Delta\theta) \\ \Delta S_q s = -k_i (\Delta i_q^s - I_d^{\text{ref}} \sin \Delta\theta) \end{cases} \quad (7)$$

式中,“ Δ ”为对应状态变量的小扰动;不出现在角标中,而是单独出现并参与运算的 s 为Laplace算子。

小扰动时 $\Delta\theta$ 一般较小,结合图3可知:

$$\Delta\theta \approx \sin \Delta\theta \approx \Delta u_{gq}^s / U_g \quad (8)$$

式中, U_g 为PCC电压的稳态幅值; u_{gq}^s 为 u_g 的 q 轴分量。

结合式(7)、(8),并网变流器导纳模型为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta i_d^s \\ \Delta i_q^s \end{bmatrix} = Y \begin{bmatrix} \Delta u_{gd}^s \\ \Delta u_{gq}^s \end{bmatrix} \\ Y = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{I_q^{\text{ref}}}{U_g} \cdot \frac{k_p s + k_i}{Ls^2 + k_p s + k_i} \\ \frac{I_d^{\text{ref}}}{U_g} \cdot \frac{k_p s + k_i}{Ls^2 + k_p s + k_i} & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9) \quad (10)$$

1.3 弱电网建模

由于变流器输出电流会对弱电网端电压造成影响(图2),故需要推导出弱电网等效阻抗模型。由图2可知:

$$\begin{cases} L_g \frac{di_d^s}{dt} = \omega L_g i_q^s + u_{gd}^s - u_{sd}^s \\ L_g \frac{di_q^s}{dt} = -\omega L_g i_d^s + u_{gq}^s - u_{sq}^s \end{cases} \quad (11)$$

式中, u_{gd}^s 、 u_{gq}^s 分别为PCC电压 u_g 的系统 d 、 q 轴分量; u_{sd}^s 、 u_{sq}^s 分别为理想电压源 u_s 的系统 d 、 q 轴分量。

在平衡点处对式(11)线性化并进行Laplace变

换,则可获得弱电网阻抗模型:

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{gd}^s \\ \Delta u_{gq}^s \end{bmatrix} = Z \begin{bmatrix} \Delta i_d^s \\ \Delta i_q^s \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$Z = \begin{bmatrix} L_g s & -\omega L_g \\ \omega L_g & L_g s \end{bmatrix} \quad (13)$$

2 系统稳定性解析解及机理分析

2.1 基于MIMO理论的系统稳定性解析解推导

当并网变流器接入弱电网时,PCC点电压波动会通过式(10)所示的变流器导纳矩阵影响变流器输出电流;进一步,变流器输出电流会通过式(13)所示的网络阻抗矩阵影响PCC点电压,形成闭环交互系统,如图4所示。

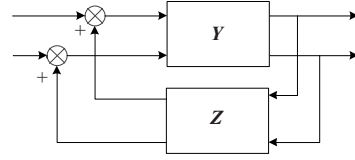


图4 并网变流器接入弱电网模型

Figure 4 Connection model of grid-connected converter to weak grid

由图4可得系统传递函数为

$$G(s) = (I - YZ)^{-1} Y \quad (14)$$

一般而言,变流器导纳矩阵 Y 是稳定的。则由MIMO理论可知^[31], $G(s)$ 的稳定性由以下特征方程决定:

$$\det(I - YZ) = 0 \quad (15)$$

结合式(10)、(13),式(15)具体展开式为

$$(L - \alpha_d L_g k_p) s^2 + [(1 + \alpha_q \omega L_g) k_p - \alpha_d L_g k_i] s + (1 + \alpha_q \omega L_g) k_i = 0 \quad (16)$$

式中, $\alpha_d = I_d^{\text{ref}} / U_g$, $\alpha_q = I_q^{\text{ref}} / U_g$ 。

若系统保持稳定,则需要式(16)的特征值位于复平面的右半平面,根据Routh-Hurwitz判据,式(16)各系数需满足下述条件之一。

$$\begin{cases} \text{条件1} & \begin{cases} L - \alpha_d L_g k_p > 0 \\ (1 + \alpha_q \omega L_g) k_p - \alpha_d L_g k_i > 0 \\ (1 + \alpha_q \omega L_g) k_i > 0 \end{cases} \\ \text{条件2} & \begin{cases} L - \alpha_d L_g k_p < 0 \\ (1 + \alpha_q \omega L_g) k_p - \alpha_d L_g k_i < 0 \\ (1 + \alpha_q \omega L_g) k_i < 0 \end{cases} \end{cases}$$

通常PCC点 u_g 和 u_s 之间的相角差小于 90° ,根据图5所示的电压相量可得:

$$U_g = \sqrt{U_s^2 - (\omega L_g I_d^{\text{ref}})^2} - \omega L_g I_q^{\text{ref}} \quad (17)$$

其中, U_s 为 u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 的幅值, 故 $U_g + \omega L_g I_q^{\text{ref}} > 0$, 也即 $1 + \alpha_q \omega L_g > 0$ 恒成立。

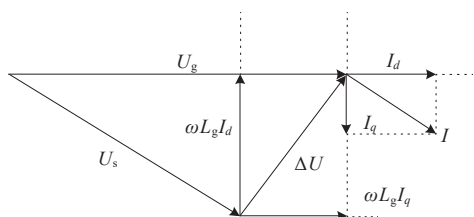


图5 电压相量

Figure 5 Voltage phasors

由式(17)可知, 条件2不成立。则基于AO-PLL的变流器小信号稳定性解析解和充要条件为

$$\begin{cases} L - \alpha_d L_g k_p > 0 \\ (1 + \alpha_q \omega L_g) k_p - \alpha_d L_g k_i > 0 \end{cases} \quad (18)$$

2.2 稳定机理分析

1) 有功无功控制耦合影响。

由式(18)可以直观看出, 相比无功电流, 变流器有功电流对系统的稳定性影响更大, 在电流环PI参数一定的情况下, 变流器有功输出同时影响2个约束条件, 而变流器无功输出则与有功输出耦合影响其中一个约束条件。

由式(17)可知, 在不考虑控制影响仅考虑电路结构时, 变流器有功无功输出约束为

$$I_q^{\text{ref}} < \sqrt{U_s^2 - (\omega L_g I_d^{\text{ref}})^2} \quad (19)$$

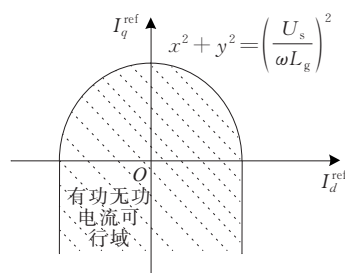
其可行域如图6(a)所示。

在控制策略影响下, 系统稳定还需满足式(18)。结合式(17)、(18), 在PI参数一定情况下, 可得变流器有功无功输出约束为

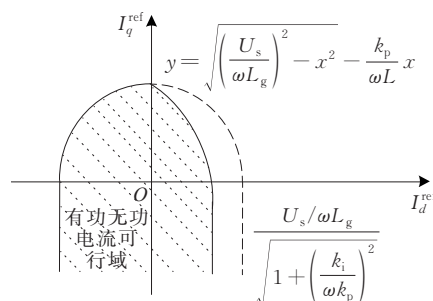
$$\begin{cases} I_q^{\text{ref}} < \sqrt{(U_s/\omega L_g)^2 - (I_d^{\text{ref}})^2} \\ I_d^{\text{ref}} < (U_s/\omega L_g) / \sqrt{1 + (k_i/\omega k_p)^2} \\ I_q^{\text{ref}} < \sqrt{(U_s/\omega L_g)^2 - (I_d^{\text{ref}})^2} - (k_p/\omega L) I_d^{\text{ref}} \end{cases} \quad (20)$$

其可行域如图6(b)所示。

从图6可以看出, 控制策略主要限制了1、4象限电流输出, 最大可输出有功电流由 $U_s/\omega L_g$ 降低到 $(U_s/\omega L_g) / \sqrt{1 + (k_i/\omega k_p)^2}$ 。此外, 变流器输出容性无功时 ($I_q^{\text{ref}} > 0$) 系统稳定裕度降低, 也进一步限制了有功电流输出能力; 相反, 变流器输出感性无功时 ($I_q^{\text{ref}} < 0$) 系统稳定裕度会有所提升, 可促进有功电流输出能力。同时可以看出, 若变流器工作在整流状态 ($I_d^{\text{ref}} < 0$), 则系统稳定裕度会显著增加。



(a) 无控制影响



(b) 有控制影响

图6 有功无功电流可行域

Figure 6 Feasible region of active and reactive current

2) 比例系数和积分系数的不同影响。

由式(18)可以直观看出, 相比积分系数, 电流环控制器的比例系数对系统稳定性的影响更大。比例系数对2个约束条件均有影响, 积分系数则是和比例系数共同耦合影响其中一个约束条件。基于式(18), 可得系统稳定运行时PI参数的可行域, 如图7所示。

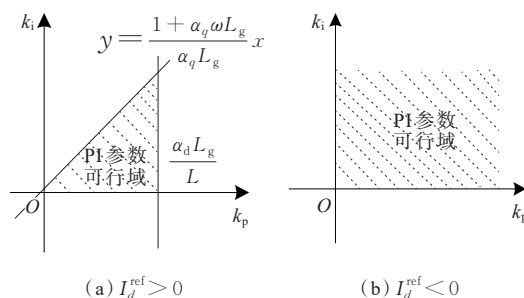
(a) $I_d^{\text{ref}} > 0$ (b) $I_d^{\text{ref}} < 0$

图7 PI参数可行域

Figure 7 Feasible region of PI parameter

由图7可知, 变流器运行在整流模式 ($I_d^{\text{ref}} < 0$) 的稳定裕度明显大于运行在逆变模式时 ($I_d^{\text{ref}} > 0$) 的稳定裕度。进一步, 在逆变模式时, k_p 过大和过小均不利于系统稳定, k_i 降低是有利于系统稳定的。此外, 结合式(20)可以看出, k_p 和 k_i 对变流器稳定性的影响机理不同。

如图8(a)所示, 在积分和比例系数比值 k_i/k_p 一定情况下, k_p 增大影响1、4象限曲线斜率, 限制了1、

4象限有功无功电流的可行域。为保持系统稳定性,在相同有功电流输出下,变流器可输出的容性无功显著降低。若变流器补偿一定的感性无功,则变流器可输出的最大有功电流保持不变。如图8(b)所示,在 k_p 一定情况下,为保持系统稳定性, k_i/k_p 增大会显著限制变流器可输出的最大有功电流,对系统无功无影响。因此,电流环控制器 k_p 主要影响系统容性无功电流输出,而 k_i/k_p 主要影响系统有功电流输出。

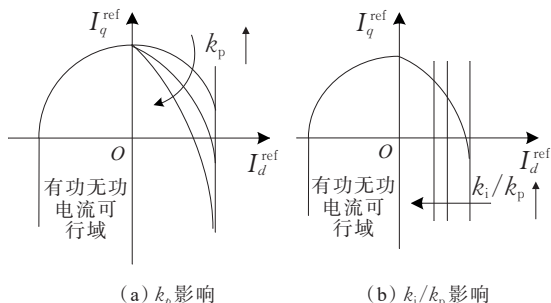


图8 比例和积分系数不同影响

Figure 8 Different influence of PI parameter

3) 短路比内涵分析。

短路比(short circuit ratio, SCR)概念被广泛用于评价弱交流电网的网络强度,并成为直流系统馈入弱交流系统时稳定运行的重要指标^[36-37]。现有文献大多通过波特图等结合具体仿真案例,研究不同短路比条件下的系统稳定裕度,而少有文献直接给出短路比与系统稳定性之间的解析关系。针对这一问题,本文通过系统稳定性解析解,直观解释了利用短路比来刻画系统稳定裕度的内涵。

系统稳定性充要条件式(18)可等效为

$$\begin{cases} U_g^2/\omega L_g > U_g I_d^{\text{ref}} \cdot k_p/\omega L \\ U_g^2/\omega L_g > U_g I_d^{\text{ref}} \cdot k_i/\omega k_p (1 + \alpha_q \omega L_g) \end{cases} \quad (21)$$

若 $U_g \approx U_s$ 且变流器向电网注入功率,即 $I_d^{\text{ref}} > 0$ 时,式(21)可以转化为

$$\begin{cases} S_{\text{CR}} > k_p/\omega L \\ (1 + \alpha_q \omega L_g) \cdot S_{\text{CR}} > k_i/\omega k_p \end{cases} \quad (22)$$

式中, $S_{\text{CR}} = S_{\text{ac}}/P_{\text{dc}} = U_s^2/\omega L_g U_g I_d^{\text{ref}} \approx U_g^2/\omega L_g V_g I_d^{\text{ref}}$,为短路比^[36-37], S_{ac} 为交流系统容量, P_{dc} 为变流器馈入的有功。

从式(22)可以直观看出,系统SCR对电流环PI参数、滤波器L等进行了约束限制,且SCR越小即交流网越弱,约束越紧;SCR越大即交流网越强,约束越松。所以在弱交流电网下,并网变流器稳定控制难度更大。

此外,变流器无功注入会显著影响PCC点电压幅值,导致 $U_g \approx U_s$ 不成立,此时运用SCR评价系统稳定裕度会造成较大偏差。文献[36-37]提供的关于无功对短路比的线性修正方法 $S_{\text{CR}} = (S_{\text{ac}} - Q)/P_{\text{dc}}$,并不能严格按照式(21)、(22)推导出来,只能提供一定的参考。

2.3 AO-PLL与SRF-PLL之间的关系

传统SRF-PLL的控制结构如图9所示,据此可以获得SRF-PLL的小信号模型^[23-30]:

$$\Delta\theta = \frac{k_{\text{pll}P} s + k_{\text{pll}I}}{s^2/u_g + k_{\text{pll}P} s + k_{\text{pll}I}} \cdot \frac{\Delta u_{\text{gq}}^s}{U_g} \quad (23)$$

式中, $k_{\text{pll}P}$ 为传统SRF-PLL控制器的比例系数; $k_{\text{pll}I}$ 为传统SRF-PLL控制器的积分系数。

结合式(8)、式(23)可以看出,AO-PLL是SRF-PLL的稳态响应,因此AO-PLL比SRF-PLL同步速度更快。此外,从滤波器角度来看,SRF-PLL中的PI控制器是锁相环的环路滤波器,积分模块是锁相环的压控振荡器,二者都有高频率波特性,可认为SRF-PLL是在AO-PLL的基础之上增加了二阶低通滤波器,滤除了高频部分,因此SRF-PLL响应相对较慢。

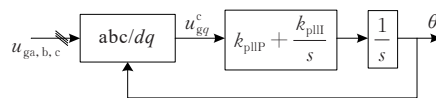


图9 SRF-PLL控制结构

Figure 9 Control structure of SRF-PLL

总体来讲,可等效认为AO-PLL的带宽大于SRF-PLL,因此,基于AO-PLL的变流器稳定运行条件可作为基于SRF-PLL的变流器稳定运行的充分条件。

3 算例分析

为验证相关理论分析的有效性,本文使用MATLAB 2021b/SIMULINK软件进行相应的仿真验证。仿真步长为 1×10^{-5} ,仿真时间为1s,系统拓扑结构及变流器控制见图2,相关参数如表1所示。

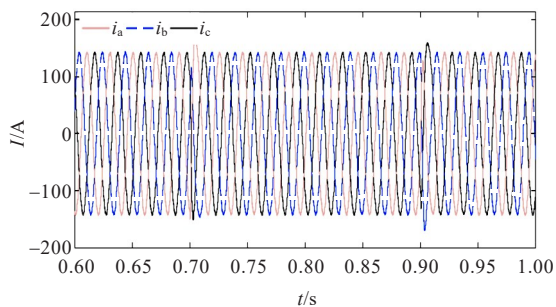
表1 系统参数

Table 1 System parameters

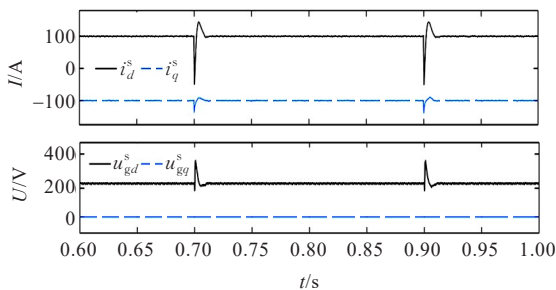
滤波电感L/mH	线路电感L _g /mH	U _s /V	$\omega/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	
2.5	1	311	100 π	
U _{ac} /V	k _p	k _i	I _d ^{ref} /A	I _q ^{ref} /A
1 200	2	800	100	-100

1) 正常运行工况。

所提 AO-PLL 控制策略在表 1 中额定工况下的性能如图 10 所示,在 $t=0.7、0.9$ s 时,电网电压相位依次突变 90° ,并网变流器 $I_d^{\text{ref}} = 100$ A、 $I_q^{\text{ref}} = -100$ A 不变。额定工况下系统参数满足式 (18),即可以保证稳定运行。



(a) 变流器三相电流



(b) 变流器 dq 电流与 PCC 点 dq 电压

图 10 额定条件下基于 AO-PLL 的变流器性能

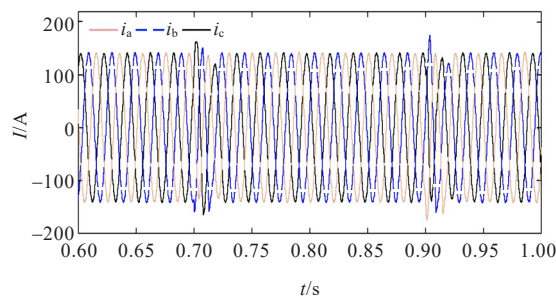
Figure 10 System performance of SRF-PLL based converters under rated conditions

在系统稳定运行的前提下,所提 AO-PLL 控制策略能够及时跟踪电网电压相位,快速调整有功、无功电流,在电网电压有较大相位突变的前提下,能够在半个周期内实现稳定调节,如图 10(a)所示。值得一提的是,在电网电压波动过程中,AO-PLL 始终能准确锁相,保持 q 轴电压为 0,如图 10(b)所示。

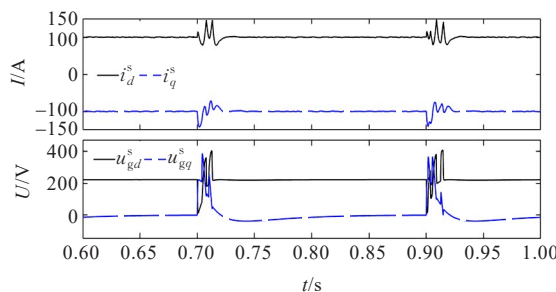
传统 SRF-PLL 的控制性能如图 11 所示,运行工况与图 10 相同,可以看出,在电网电压相位有较大突变情况下,三相电流需要 2~3 个周期才能调整完毕;同时结合图 10(b)、11(b),可以明显看出,SRF-PLL 的响应速度要慢于 AO-PLL,其 q 轴电压需较长时间才能调整为 0。

2) 有功无功耦合影响。

有功无功耦合影响如图 12 所示, I_d^{ref} 输出保持不变,为 350 A,在 $t=0.7、0.9$ s 时, I_q^{ref} 由 -150 A 依次突变到 50 A,即由感性无功变化到容性无功(为表述方便,下文以 $(I_d^{\text{ref}}, I_q^{\text{ref}})$ 来表征不同的运行状态)。



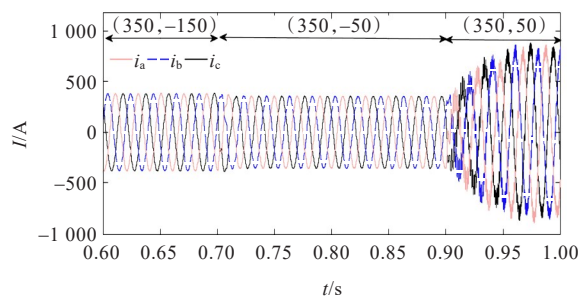
(a) 变流器三相电流



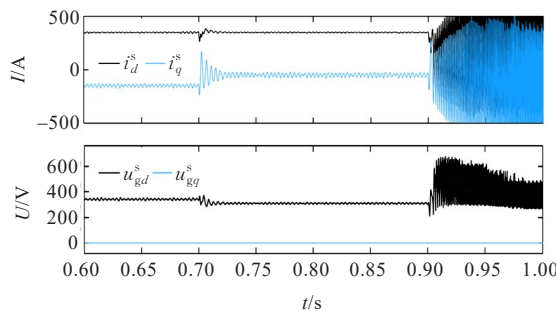
(b) 变流器 dq 电流与 PCC 点 dq 电压

图 11 额定条件下基于 SRF-PLL 的变流器性能

Figure 11 System performance of AO-PLL based converters under rated conditions



(a) 变流器三相电流



(b) 变流器 dq 电流与 PCC 点 dq 电压

图 12 有功无功耦合影响

Figure 12 Coupling influence of active and reactive power

根据式 (18),解析解得出的稳定性边界与系统运行点的关系如图 13 所示, I_d^{ref} 输出保持不变,为 350 A,根据式 (20) 可以计算系统稳定运行的条件为 $I_q^{\text{ref}} < 35$ A。为了验证无功电流改变时稳定性解

析解的正确性,由图 13 可以得出:运行状态为(350, -150)时,系统处于可行域内,因此保持稳定;运行状态切换为(350, -50)时,系统经过一个周波的过渡进入稳定状态,但是运行点接近稳定性边界,稳定裕度降低;运行状态切换为(350, 50)时,系统的运行点已经位于可行域以外,稳定约束条件不满足,变流器的输出电流逐渐发散,系统处于失稳状态。图 12 中电流、电压波形与上述理论分析十分吻合。同时还可以看出,相较于输出容性无功($I_q^{\text{ref}} > 0$),变流器输出感性无功($I_q^{\text{ref}} < 0$)可促进其有功电流的输出。以上仿真结果可充分验证:当变流器输出容性无功($I_q^{\text{ref}} < 0$)时系统稳定裕度降低,当变流器输出感性无功($I_q^{\text{ref}} > 0$)时系统稳定裕度有所提升。

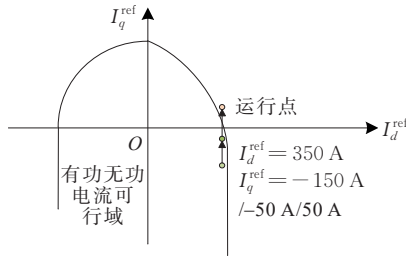
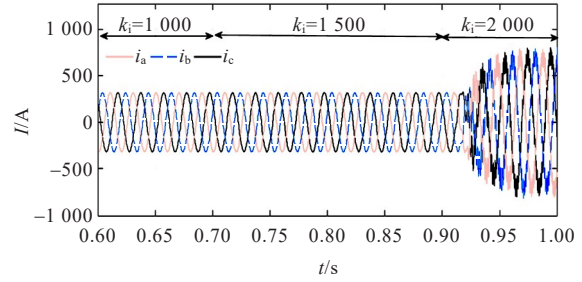


图 13 系统稳定性边界与系统运行点的关系
Figure 13 Relationship between system stability boundary and system operation point

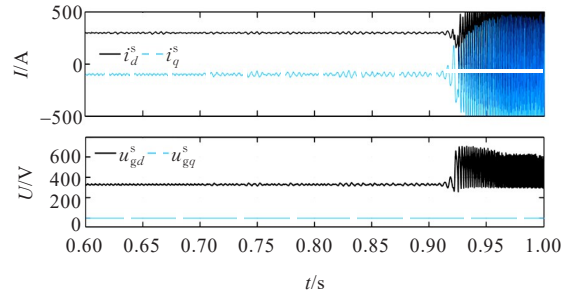
3) 控制参数的不同影响。

保持 k_p 不变、 k_i 不断增大,也即 k_i/k_p 不断增大时对系统稳定性的影响如图 14 所示,仿真中 $I_d^{\text{ref}} = 300 \text{ A}$ 、 $I_q^{\text{ref}} = -100 \text{ A}$,在 $t=0.7、0.9 \text{ s}$ 时, k_i 由 1 000 依次突变到 2 000,其他参数与表 1 保持相同。其中,变流器输出感性电流是为了保证其能输出最大有功电流。

根据式(18),解析解得出的稳定性边界与改变控制参数后的系统运行点的关系如图 15 所示。为了验证控制参数 k_p 不变、 k_i/k_p 不断增大时稳定性解析解的正确性,结合仿真结果可以看出,随着 k_i/k_p 不断变大,为保持系统稳定性,变流器可输出的最大有功电流不断下降,如图 15(a)所示。最终在 $k_i = 2 000$ 时,经过式(20)计算,变流器小信号稳定性解析解存在的条件是,变流器能够输出的最大有功电流为 296 A,此时系统能够输出的系统的运行点刚好位于可行域以外,系统处于失稳状态。此仿真结论可以充分验证:当 k_p 不变, k_i/k_p 增大会显著限制变流器可输出的最大有功电流。



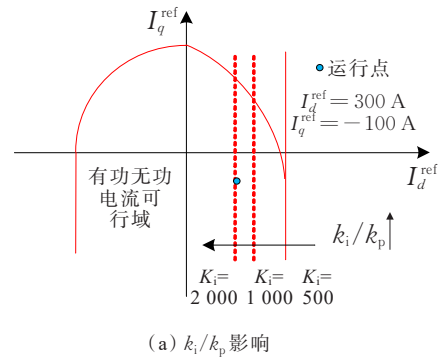
(a) 变流器三相电流



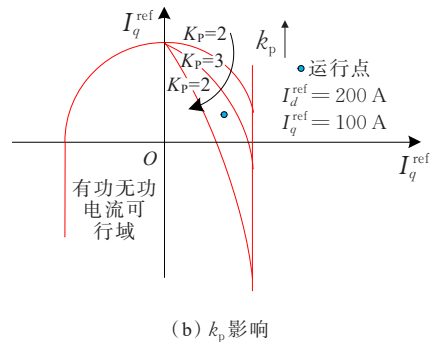
(b) 变流器 dq 电流与 PCC 点 dq 电压

图 14 k_i/k_p 影响

Figure 14 Influence of k_i/k_p



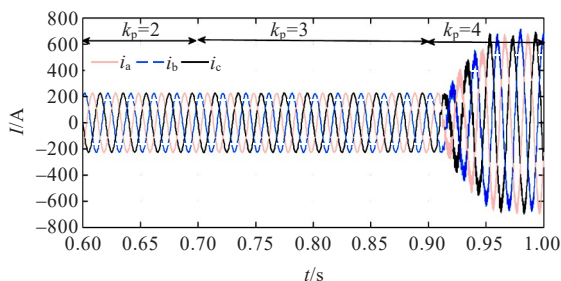
(a) k_i/k_p 影响



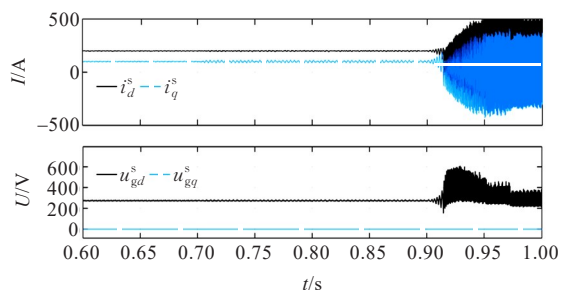
(b) k_p 影响

图 15 稳定性边界与改变控制参数后的系统运行点的关系
Figure 15 Relationship between system stability boundary and system operation point after changing control parameters

保持 k_i/k_p 不变、 k_p 不断增大时对系统稳定性的影响如图 16 所示,仿真中 $I_d^{\text{ref}} = 200 \text{ A}$ 、 $I_q^{\text{ref}} = 100 \text{ A}$,在 $t=0.7、0.9 \text{ s}$ 时, k_p 由 2 依次突变到 4,其他参数与表 1 保持相同。其中变流器输出容性电流是为了验证 k_p 变化对变流器无功输出能力的影响。



(a) 变流器三相电流



(b) 变流器 dq 电流与 PCC 点 dq 电压

图 16 k_p 影响Figure 16 Influence of k_p

为了验证控制参数 k_i/k_p 不变、 k_p 不断增大时稳定性解析解的正确性,结合仿真结果可以看出,随着 k_p 不断变大,为保持系统稳定性,变流器可输出的最大容性无功电流不断下降,如图 15(b) 所示。当最终在 $k_p=4$ 、 $I_d^{\text{ref}}=200$ A 时,若使系统保持稳定,经过式(20)计算,变流器小信号稳定性解析解存在的条件是,变流器能够输出的最大无功电流必须小于 -49 A,因此,变流器运行在 $I_d^{\text{ref}}=200$ A、 $I_q^{\text{ref}}=100$ A 工况下已经位于可行域外,因此系统失稳。此仿真结论可以充分验证:当理论分析相符,即 k_i/k_p 不变、 k_p 不断增大会影响 1、4 象限曲线斜率,限制 1、4 象限有功无功可行域,在相同的有功电流输出下,变流器可输出的容性无功显著降低。

4 结语

本文基于 AO-PLL 的变流器控制策略得到了并网变流器并入弱电网时稳定性的封闭解析解,获得了系统稳定性的充要条件。并据此揭示了更多有关稳定性的本质机理。

1) 变流器有功无功输出均会影响系统稳定性。在一定系统参数条件下,存在有功无功耦合的可行域,有功、无功四象限的稳定裕度不同,有功或者无功越限均可引发系统失稳。

2) 电流环比例控制器和积分控制器对系统稳定性的影响机理不同。 k_p 主要影响系统无功电流稳

定性,而 k_i/k_p 主要影响系统有功电流稳定性。传统结论中比例系数变化影响有功稳定性的本质是比例系数变化引起了 k_i/k_p 的变化导致。

3) 通过稳定性充要条件,直观解释了利用短路比来刻画系统稳定裕度的内涵,并指出在变流器注入无功或者 PCC 点电压幅值偏离额定值的情况下,利用短路比来评价系统稳定裕度会有较大误差。

此外,阐述了所提 AO-PLL 和常规 SRF-PLL 之间的内在联系,指出相关稳定性结论可作为常规 SRF-PLL 控制下变流器稳定的充分条件。最后,通过相关算例验证了前述理论分析的正确性。

参考文献:

- [1] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J].中国电机工程学报,2021,41(2):461-475.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.
- [2] 薛翼程,张哲任,徐政,等.构网型变流器对交流系统低频振荡的影响分析与阻尼控制[J].电力系统自动化,2023,47(16):103-113.
XUE Yicheng, ZHANG Zheren, XU Zheng, et al. Impact analysis and damping control of grid-forming converter for low-frequency oscillation of AC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 103-113.
- [3] 刘普,崔艺博,刘兆峰,等.基于阻抗分析法的并网变流器稳定性统一分析方法研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(4):114-125.
LIU Pu, CUI Yibo, LIU Zhaofeng, et al. The unified analysis method of grid-connected converter stability based on impedance analysis[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 114-125.
- [4] 袁小明.大规模风电并网问题基本框架[J].电力科学与技术学报,2012,27(1):16-18.
YUAN Xiaoming. Framework of problems in large scale wind integration[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(1): 16-18.
- [5] 李明节,于钊,许涛,等.新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J].电网技术,2017,41(4):1035-1042.
LI Mingjie, YU Zhao, XU Tao, et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1035-1042.
- [6] SHU D, XIE X, RAO H, et al. Sub- and super-synchronous interactions between STATCOMs and weak AC/DC

- transmissions with series compensations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 7424-7437.
- [7] 夏杨红,孙勇,韦巍. 光伏接入直流配电网时的功率振荡分析[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6814-6824.
XIA Yanghong, SUN Yong, WEI Wei. Power oscillation analysis of PV generators connected to DC distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6814-6824.
- [8] 毕悦,方思瑞,于舒祺. 含光伏并网的弱交流系统低频振荡协调控制策略[J]. 电力科学与技术学报,2021,36(4): 59-65.
BI Yue, FANG Sirui, YU Shuqi. Coordinated control strategy for low frequency oscillations of weak AC grid connected PV systems[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4): 59-65.
- [9] 雷顺广,束洪春,李志民. 基于桥臂功率特征的全一半混合型柔性直流输电线路保护[J]. 电工技术学报,2023,38(13):3563-3575.
LEI Shunguang, SHU Hongchun, LI Zhimin. Full-semi-hybrid flexible DC transmission line protection based on bridge arm power characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3563-3575.
- [10] WANG X, BLAABJERG F. Harmonic stability in power electronic-based power systems: concept, modeling, and analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2858-2870.
- [11] WANG X, BLAABJERG F, WU W. Modeling and analysis of harmonic stability in an AC power-electronics-based power system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12): 6421-6432.
- [12] 赵峥,李明,田园园,等. 江苏如东海上风电柔直工程系统谐振分析与抑制[J]. 电力建设,2023,44(6): 144-152.
ZHAO Zheng, LI Ming, TIAN Yuanyuan, et al. Resonance analysis and suppression in Jiangsu Rudong offshore wind power flexible DC system[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(6): 144-152.
- [13] 雷傲宇,汪林光,梅勇,等. 多端柔性直流电网的中高频振荡特性分析[J]. 电网与清洁能源,2023,39(7):55-60.
LEI Aoyu, WANG Linguang, MEI Yong, et al. An analysis of medium & high-frequency oscillation characteristics in multi-terminal flexible HVDC networks [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(7): 55-60.
- [14] 曹芸凯,赵涛,朱爱华,等. 计及电网和线路阻抗的并联逆变器谐振抑制方法[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(2):188-196.
CAO Yunkai, ZHAO Tao, ZHU Aihua, et al. Resonance suppression method for parallel inverters considering the grid and line impedance[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 188-196.
- [15] 杨东升,阮新波,吴恒. 提高LCL型并网逆变器对弱电网适应能力的虚拟阻抗方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2327-2335.
YANG Dongsheng, RUAN Xinbo, WU Heng. A virtual impedance method to improve the performance of LCL-type grid-connected inverters under weak grid conditions [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2327-2335.
- [16] TANG Y, LOH P. C, WANG P, at al. Exploring inherent damping characteristic of LCL-filters for three-phase grid-connected voltage source inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1433-1443.
- [17] AAPRO A, MESSO T, ROINILA T, at al. Effect of active damping on output impedance of three-phase grid-connected converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 64(9): 7532-7541.
- [18] LI X, FANG J, TANG Y, at al. Capacitor-voltage feedforward with full delay compensation to improve weak grids adaptability of LCL-filtered grid-connected converters for distributed generation systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(1): 749-764.
- [19] 蒙志全,辛焕海,董炜,等. 控制系统扰动下并网变流器广义阻抗测量方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(18): 5381-5391.
MENG Zhiquan, XIN Huanhai, DONG Wei, et al. Generalized-impedance measurement for grid-connected converters based on perturbation in control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5381-5391.
- [20] 辛焕海,董炜,袁小明,等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报,2016,36(22):6013-6027.
XIN Huanhai, DONG Wei, YUAN Xiaoming, et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices infeed to power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6013-6027.
- [21] 辛焕海,章枫,于洋,等. 多馈入直流系统广义短路比:定义与理论分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(3):633-647.
XIN Huanhai, ZHANG Feng, YU Yang, et al. Generalized short circuit ratio for multi-infeed DC systems: definition and theoretical analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 633-647.
- [22] 陈博,曾成碧,苗虹,等. 提高并网逆变器在弱电网下鲁棒稳定性的改进电压前馈方法[J]. 电力科学与技术学报,2021,36(3):118-124.
CHEN Bo, ZENG Chengbi, MIAO Hong, et al. Improved voltage feedforward method for improving robust stability of grid-connected inverters in weak grids[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 118-124.
- [23] WEN B, BOROYEVICH D, BURGOS R, et al. Analysis of D-Q small-signal impedance of grid-tied inverters[J].

- IEEE Transactions on Power Electronics,2016,31(1):675-687.
- [24] ZHOU S,ZOU X,ZHU D, et al. An improved design of current controller for LCL-type grid-connected converter to reduce negative effect of PLL in weak grid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2018,6(2):648-663.
- [25] XIA Y, YU M, WANG X, et al. Describing function method based power oscillation analysis of LCL-filtered single-stage PV generators connected to weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 8724-8738.
- [26] 李培法,唐欣,王文,等. 锁相环对柔性直流输电系统换流站输入导纳的影响分析[J]. 电力科学与技术学报, 2020,35(4):20-26.
LI Peifa, TANG Xin, WANG Wen, et al. Analysis of the effect of phase-locked loop on input admittance of converter station in flexible DC transmission system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4):20-26 .
- [27] 李红,梁军杨,王振民,等. 跟网型变换器的小扰动同步稳定机理分析与致稳控制[J]. 电工技术学报, 2024,39(18):3802-3815.
LI Hong, LIANG Junyang, WANG Zhenmin, et al. Small signal synchronization stability analysis and improved control strategy for grid following converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(18):3802-3815.
- [28] 陈博,曾成碧,苗虹. 提高并网逆变器在弱电网下稳定性的虚拟阻抗附加相角补偿控制[J]. 电测与仪表, 2023,60(2):132-137.
CHEN Bo, ZENG Chengbi, MIAO Hong. Virtual impedance additional phase angle compensation control to improve the stability of grid-connected inverter in weak grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023,60(2):132-137
- [29] XIA Y, PENG Y, YANG P, et al. Different influence of grid impedance on low-and high-frequency stability of PV generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019,66(11):8498-8508.
- [30] 孙银锋,刘金鑫,梁栋. 基于附加改进有源滤波器的柔性直流输电系统高频振荡抑制策略[J]. 智慧电力, 2023,51(10):85-92.
SUN Yinfeng, LIU Jinxin, LIANG Dong. High frequency oscillation suppression strategy for flexible HVDC system based on improved active filter[J]. Smart Power, 2023,51(10):85-92.
- [31] HUANG L, XIN H, LI Z, et al. Grid-Synchronization stability analysis and loop shaping for PLL-based power converters with different reactive power control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020,11(1):501-516.
- [32] LIU H, XIE X, LIU W. An oscillatory stability criterion based on the unified dq -frame impedance network model for power systems with high-penetration renewables[J]. IEEE Transactions on Power System, 2018, 33(3), 3472-3485.
- [33] 蔡福霖,胡泽春,曹敏健,等. 提升新能源消纳能力的集中式与分布式电池储能协同规划[J]. 电力系统自动化, 2022,46(20):23-32.
CAI Fulin, HU Zechun, CAO Minjian, et al. Coordinated planning of centralized and distributed battery energy storage to improve new energy consumption[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(20) : 23-32.
- [34] 刘华坤,谢小荣,何国庆,等. 新能源发电并网系统的同步参考坐标系阻抗模型及其稳定性判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2017,37(14):4002-4007.
LIU Huakun, XIE Xiaorong, HE Guoqing, et al. Synchronous reference frame based impedance model and stability criterion for grid-connected renewable energy generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(14):4002-4007.
- [35] 李明飞,吴在军,全相军,等. 计及阻尼特性的构网型并网逆变器暂态同步稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2023,47(15):198-207.
LI Mingfei, WU Zaijun, QUAN Xiangjun, et al. Transient synchronization stability analysis of grid-forming grid-connected inverter considering damping characteristics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023,47(15): 198-207.
- [36] ZHOU J, 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.
- [37] 王焯,宁琳如,赵成勇,等. VSC-HVDC 联接弱交流系统下的新型附加频率阻尼控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018,38(10):2989-2998+3149.
WANG Ye, NING Linru, ZHAO Yongcheng, et al. A novel supplementary frequency-based damping control for VSC-HVDC station connected to a weak AC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(10):2989-2998+3149.