

并网变流器双模式自适应柔性切换控制策略

绳洁¹, 郭田田¹, 贾凯莉¹, 朱剑峰¹, 苑源¹, 王琦²

(1. 聊城供电公司, 山东 聊城 252000;

2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250001)

摘要:高渗透率分布式发电并网系统网络阻抗波动范围广, 电网常呈现弱电网特性, 锁相环和电网阻抗交互耦合导致电网跟随型(GFL)变流器与主网失去同步, 严重威胁系统稳定性, 因此, 需将部分机组灵活配置, 切换为电网构建型(GFM)以提升并网稳定性。然而电网构建型变流器功率响应慢和源侧的最大功率点跟踪相矛盾, 经济性差。为了实现系统稳定前提下最大限度地提高新能源利用率, 以并网变流器为研究对象, 提出了一种计及主网友好交互的分布式能源双模式自适应柔性切换控制策略。采用非特征谐波注入的电网阻抗辨识算法感知电网强度, 根据电网强弱自适应切换控制策略。强网下, 并网变流器采用恒功率控制策略, 快速响应最大功率点指令, 提高能源利用率。弱网下, 变流器柔性切换成虚拟同步机(VSG)控制策略, 提升惯性和阻尼支撑能力, 实现变流系统与主网友好交互。该策略增强了并网变流器在电网强度变化时的鲁棒性, 保障了系统的稳定运行。通过PLECS仿真验证了所提双模式控制策略的有效性。

关键词:电网阻抗参数辨识; 自适应双模式切换; 虚拟同步发电机

中图分类号:TM721 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed25412

Dual-mode Adaptive Flexible Switching Control Strategy for Grid-connected Converter

SHENG Jie¹, GUO Tiantian¹, JIA Kaili¹, ZHU Jianfeng¹, YUAN Yuan¹, WANG Qi²

(1. State Grid Liaocheng Power Supply Company, Liaocheng 252000, Shandong, China;

2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250001, Shandong, China)

Abstract: The grid frequently exhibits weak grid characteristics because the impedance fluctuation range of the collector network is broad in high permeability distributed generation system. The coupling relationship between the phase-locked loop and the grid impedance leads to desynchronizing between the grid-following (GFL) converter and grid, which seriously threatens the stability of the system. However, the slow power response of grid-forming (GFM) converter is contradictory to the maximum power point tracking of source side, and the economy is poor. Consequently, in order to increase the grid-connected reliability of the system, some units are necessary to be configured flexibly, which will switch to the GFM mode. Concentrating on the grid-connected converters, a dual-mode adaptive flexible switching control strategy for distributed energy was proposed considering friendly interaction between grid and converters to maximize the utilization of new energy under the premise of system stability. The grid impedance identification algorithm based on non-characteristic harmonic injection was applied to sense the power grid strength, and the control strategy was adaptively switched according to the strength of the grid. Under the circumstance of robust grid, the constant power control method was adopted, which can quickly respond to the maximum power point instruction and improve the utilization rate of renewable energy. During the weak grid, converters flexibly switch to the virtual synchronous generator (VSG) control strategy to enhance inertia and damping support capabilities, realizing the friendly interaction between converters and grid. The proposed strategy enhances the robustness of grid-connected converters during the variation of grid strength, ensuring the stable operation of the system. The effectiveness of the proposed dual-mode control strategy was validated by PLECS simulation.

Key words: identification of grid impedance parameters; adaptive dual-mode switching; virtual synchronous generator (VSG)

基金项目: 国网山东省电力公司科技项目(520611230001)

作者简介: 绳洁(1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析与控制, Email: 1505569672@qq.com

通讯作者: 王琦(2000—), 女, 硕士, 主要研究方向为微电网变流器智能控制, Email: 1290703027@qq.com

面对日益严峻的能源紧缺与环境污染,可再生能源和新型电力系统技术被广泛视为引领全球能源向绿色低碳转型的重要驱动力。可再生能源空间分布分散,多采用长距离输电线路和多台变压器将系统互连接入公共电网,此时这种高渗透率的分布式发电系统呈现出低短路比(short circuit ratio, SCR)的弱电网特性^[1-3]。新能源发电具有间歇性、随机性和波动性,由于分布式能源的投切等操作导致电网阻抗出现大幅波动。变流器作为新能源并网的接口装备,其工作特性是影响系统稳定、高效运行的关键因素。提升并网变流器在电网阻抗大幅波动时的稳定性,对实现分布式能源与主网友好交互具有重要意义。目前,并网变流器类型分为电网跟随型(简称“跟网模式”)和电网构建型(简称“构网模式”)。其中,电网跟随型并网变流器主要采用恒功率(PQ)控制,变流器对外呈现电流源特性,在强电网中能以最大功率输出电能,且具有快速的功率响应能力。但在弱电网下,由于电网阻抗的存在,锁相环(phase locked loop, PLL)会引入负相移,威胁并网系统稳定性^[4-6]。不同于电网跟随型变流器,电网构建型变流器对外呈现电压源特性,在高电网阻抗的弱电网条件下具有更大的稳定裕度。但构网模式的变流器在弱网下功率响应慢,难以准确实现最大功率点跟踪,经济性差。因此,在电网阻抗变化时,变流器跟网和构网模式的控制性能具有一定的“互补”特性。

为了保障并网变流器在电网强度宽区间变化时的稳定控制,文献[7-8]提出了一种基于自适应模式切换的虚拟同步发电机控制策略,但其没有研究电网强弱与并网变流器模式切换之间的关系,导致切换边界模糊。文献[9-10]基于电网阻抗辨识,推导了并网变流器双模式切换的边界,但没有对无缝切换过程进行研究。文献[11]提出了一种电网阻抗自适应的双模式控制策略。其基本原理为依据电网阻抗辨识结果,动态改变跟-构运行模式。这样,双模式控制策略就结合了两种并网变流器运行模式的优势。但该文献没有讨论多变流器系统模式切换的稳定性及构建模式下电网同步问题。文献[12]基于下垂控制,设计一种基于控制器状态跟随的工作模式并行切换技术,实现了下垂控制与PQ控制的平滑切换,并对电压电流双环进行了改进,但下垂控制策略不能为弱电网提供惯性和阻尼支撑能力。

综上,单一模式并网变流器在电网阻抗大幅度波动的情况下,无法兼顾系统稳定裕度和能源利用率两个综合性能指标。本文提出了一种并网变流器双模式自适应柔性切换控制策略,实现了分布式能源与主网友好交互。并网变流器在强网/较弱电网下工作于电网跟随模态(PQ控制),保证快速的功率响应,弱网条件下采用构网模态(VSG控制),保障并网变流器的稳定运行,提升系统惯量支撑能力。此外,基于电网阻抗在线辨识实现了两种工作模式的自适应切换。首先研究了变流器两种工作模式的控制策略原理与实现方法,其次利用非特征次谐波注入的电网阻抗辨识算法感知电网强度,并详细介绍了双模态柔性切换技术,最后仿真验证了所提策略的有效性。

1 两种工作模式分析

1.1 电网跟随型并网变流器控制原理

典型的电网跟随型并网变流器的结构框图如图1所示。变流器通过LCL滤波器进行并网,控制电路实现对变流器输出电流的闭环控制。

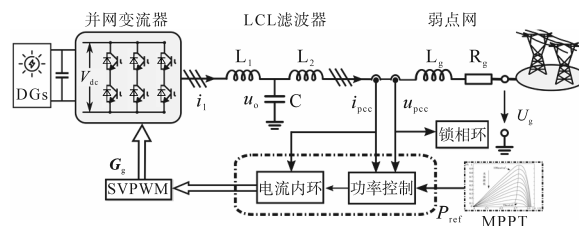


图1 电网跟随型变流器系统结构图

Fig.1 Structure diagram of grid-following converter system

图1中, V_{dc} 为变流器直流侧端口电压; L_1, L_2 和C分别为LCL滤波器的滤波电感和滤波电容; L_g 和 R_g 分别为输电线路等效的电网阻抗的感性和阻性成分; i_1 和 i_{pcc} 分别为变流器端口输出电流和滤波后的并网电流; u_u, u_{pcc} 和 U_g 分别为变流器输出电压、并网点电压和电网电压。

并网变流器输出的功率参考 P_{ref} 由最大功率点追踪(MPPT)算法提供。锁相环(PLL)用于同步电网电压的相位信息,生成并网电流的基准量, G_g 为SVPWM调制输出开关矢量。

由于弱电网下,高带宽的PLL会引入负相移,降低控制系统稳定裕度。为了保障并网变流器的稳定控制,亟需实现变流器工作模式的自适应柔性切换,从而消除PLL的影响,实现变流器与主网间的友好交互,保障系统稳定运行。

1.2 电网构建型并网变流器控制原理

电网构建型并网变流器的控制策略主要包括下垂(Droop)控制和虚拟同步发电机(VSG)控制。相比传统下垂控制,VSG控制策略通过模拟同步发电机的电气、机械等外特性,显著提升了电力电子接口惯量和阻尼支撑能力^[12-14]。此外,VSG控制还具有自主协调运行、平抑负荷波动和即插即用的优势,可实现大规模新能源友好并网。图2给出了典型的VSG系统结构控制框图。

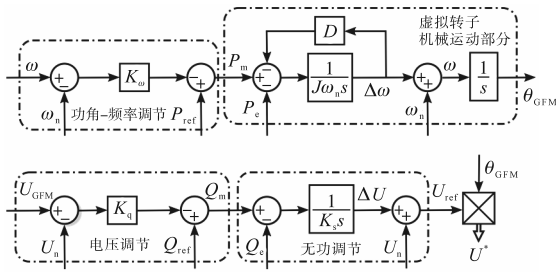


图2 VSG控制策略结构框图

Fig.2 VSG control strategy structure block diagram

有功功率调节部分的数学表达式为

$$P_m - P_{ref} = -K_\omega (\omega - \omega_n) \quad (1)$$

机械转子部分具体的数学表达式为

$$\begin{cases} J\omega_n \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D \cdot \Delta\omega \\ \theta_{GFM} = \int \omega - \omega_n dt \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω, ω_n 分别为变流器实际输出角频率和额定角频率; K_ω 为虚拟调速器的有功-频率下垂系数; J, D 分别为变流器虚拟的转动惯量和阻尼系数; P_m, P_e 分别为系统的机械功率和电磁功率; P_{ref} 为VSG输出电磁功率参考值; $\Delta\omega$ 为变流器实际输出角频率与额定角频率的偏差; θ_{GFM} 为变流器输出电压的相位。

同步发电机通过励磁器调节输出电压,基于此思想,引入虚拟励磁器可实现无功功率与电压下垂特性的模拟,包括电压调节和无功-电压下垂两部分,相互作用共同调节系统的输出电压。

虚拟励磁器通过改变虚拟励磁电流实现无功调压,表达式如下:

$$Q_{ref} - Q_e = K_q (U_{GFM} - U_n) \quad (3)$$

式中: K_q 为积分调节器的调节系数; U_{GFM} 为变流器端口电压输出电压幅值; U_n 为变流器输出额定电压; Q_{ref}, Q_e 分别为无功参考和输出值。

为保证输出机端电压与参考电压相同,需进行电压调制,表达式如下:

$$U_{ref} = U_n + \frac{1}{K_s s} (Q_m - Q_e) \quad (4)$$

式中: K_s 为积分调节系数; U_{ref} 为变流器输出电压幅值参考。

2 双模态自适应柔性切换控制

2.1 跟-构网双模态自适应柔性切换控制策略

注意到,在电网强弱宽区间变化时,工作在跟网模态和构网模态的变流器控制性能和稳定性具有“互补性”。本节研究了基于电网阻抗辨识的跟-构网双模态自适应切换控制策略。

如图3所示,首先,通过电网阻抗辨识算法感知电网强弱程度,其次,并网变流器根据电网强度自适应切换运行模式。该策略可有效提高并网变流器在电网强度大幅波动情况下的稳定性。

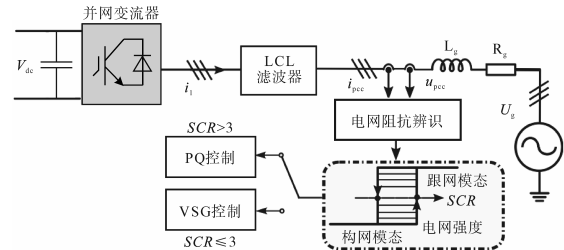


图3 基于电网阻抗辨识的跟-构网模态自适应切换控制策略

Fig.3 Adaptive switching control strategy for following grid mode based on grid impedance identification

2.2 基于非特征次谐波注入的电网阻抗辨识

等效电网强度随着线路距离以及变流装置的切投等操作存在较大范围的波动。电网强度一般通过短路电流比(SCR)来表征,即

$$SCR = \frac{S_{ac}}{S_{DC}} = \frac{U_g^2}{S_{DC} Z_g} \quad (5)$$

式中: S_{DC} 为分布式发电系统并网的额定容量; S_{ac} 为电网的短路容量; U_g 为电网电压幅值。

由式(5)可知,电网的强弱程度与电网阻抗大小呈反比例关系。一般认为,当 $SCR > 20$ 时为强电网,当 $3 \leq SCR \leq 20$ 时为较弱电网,当 $SCR < 3$ 时为弱电网。电网跟随型变流器可以在强网和较弱电网时($SCR > 3$)稳定运行,若电网强度小于等于3,电网跟随型变流器会出现谐波谐振甚至威胁系统稳定性。

为提高变流器智能化水平,本文采取非特征次谐波注入法进行电网阻抗辨识,使其具备感知电网强度并实现工作模态的柔性切换。

谐波电流注入法是目前应用最广泛的阻抗在线检测方法,主要分为谐波注入和电流响应提

取两部分^[15]。离散傅里叶变换(discrete fourier transform, DFT)算法用于谐波提取。为了避免电网背景谐波影响电网阻抗检测精度,本文选择非特征谐波 75 Hz 为扰动信号注入,在给定电流上周期性叠加谐波扰动。根据下式计算所注入的特定次谐波频率对应的电网阻抗值:

$$Z_g(h) = \frac{U_{PCC}(h) - U_{PCC}^0(h)}{I_{PCC}(h)} \quad (6)$$

$$R_g = Z_g(h)\cos\theta_{zh} = \frac{U_{PCC}(h)}{I_{PCC}(h)}\cos(\theta_{uh} - \theta_{ih}) \quad (7)$$

$$L_g = \frac{Z_g(h)\sin\theta_{zh}}{\omega_h} = \frac{U_{PCC}(h)}{\omega_h I_{PCC}(h)}\sin(\theta_{uh} - \theta_{ih}) \quad (8)$$

式中: $U_{PCC}(h)$, $I_{PCC}(h)$ 分别为注入谐波后 PCC 的电压和电流响应复矢量,其幅值分别为 $U_{PCC}(h)$ 和 $I_{PCC}(h)$,相角分别为 θ_{uh} 和 θ_{ih} ; $U_{PCC}^0(h)$ 为未注入谐波时 PCC 电压的 75 Hz 分量,由于电网 75 Hz 背景谐波含量极少,近似认为 $U_{PCC}^0(h) = 0$; ω_h 为所注入谐波的角频率; $Z_g(h)$ 为所注入的特定次谐波频率下的电网阻抗复矢量,其幅值为 $Z_g(h)$,相角为 θ_{zh} 。

2.3 双模态柔性切换控制策略

本文采用基于控制器同步映射运算的模式切换方法。依据并网变流器两种工作模式下电流内环结构的相似性进行柔性切换,如图 4 所示。

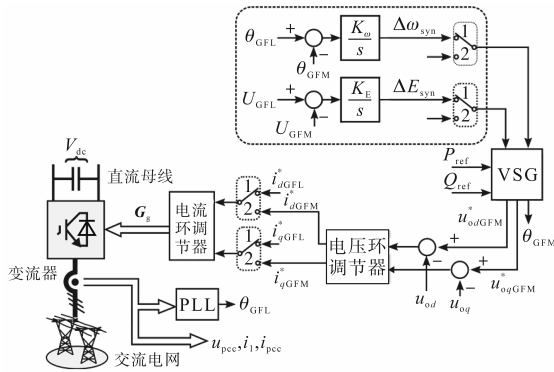


图 4 跟-构网双模态柔性切换方法

Fig.4 Dual-mode flexible switching method for tracking network

图 4 中, θ_{GFL} 为变流器工作在跟网模式时锁相环获取的并网点电压相位角, θ_{GFM} 为变流器工作在构网模式时输出电压相位角, U_{GFL} 和 U_{GFM} 分别为变流器工作在跟网和构网模式下输出的端口电压, $\Delta\omega_{syn}$ 和 ΔE_{syn} 分别为模式切换位差与幅值差, v_{oq} 和 v_{od} 分别为 $d-q$ 坐标系下变流器输出电压交、直轴分量, v_{oqGFM}^* 和 v_{odGFM}^* 分别为 $d-q$ 坐标系下变流器输出电压参考值 U_{ref} 的交、直轴分量, i_{dGFM}^* 和 i_{qGFM}^* 分别为 $d-q$ 坐标系下电网构建型变流器输

出电流参考值 i_{GFM}^* 的交、直轴分量, i_{dGFL}^* 和 i_{qGFL}^* 分别为 $d-q$ 坐标系下跟网变流器输出电流参考值 i_{GFL}^* 的交、直轴分量。

跟-构网双模态柔性切换的条件主要从跟网切换至构网模式、构网切换至跟网模式两个角度来看。当图 4 所有选择开关由 1 切换到 2 时,并网变流器由 PQ 控制切换为 VSG 控制。当图 4 所有选择开关由 2 切换到 1 时,并网变流器由 VSG 控制切换 PQ 控制。

对于跟网切换至构网模式,为了避免切换过程对电网造成电压冲击,需要电网同步环节。其基本原理为使切换后的构网变流器输出的电网频率、相位与幅值与所接入的端口一致,这通常需要同步电压预同步控制,其基本方程为

$$\begin{cases} \omega_{syn} = \omega + \Delta\omega_{syn} = \omega_0 + \frac{K_\omega}{s}(\theta_{GFL} - \theta_{GFM}) \\ U_{syn} = U_{GFM} + \Delta E_{syn} = U_0 + \frac{K_E}{s}(U_{GFL} - U_{GFM}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: K_ω , K_E 分别为相位同步和幅值同步的积分参数; ω_{syn} , U_{syn} 分别为经过模式切换位差与幅值差补偿后电网构建型变流器输出电压的角频率和幅值。

对于构网切换至跟网模式,在切换的瞬间需要保证变流器侧跟网两种工作模式下电流参考 i_{GFL}^* 与 i_{GFM}^* 一致,从而保证系统输出电流、电压在切换时刻不发生震荡,实现柔性切换。

3 仿真分析

为了验证所提分布式能源双模式自适应柔性切换控制策略的有效性,本文利用 PLECS 搭建如图 1 所示的单机并网模型进行仿真验证。具体仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
直流电压 V_{dc}	50 V	谐波幅值 I_{har}	2 A
电压幅值 U_g	24.5 V	电网电阻 R_g	0.5 Ω
并网电压频率 f_g	50 Hz	电网电感 L_g	1 mH
额定功率 P_N	200 W	开关频率 f_{sw}	25 kHz
LCL 滤波电感 L_1	2.5 mH	附加电阻 R_{g1}	0.5 Ω
LCL 滤波电感 L_2	2.5 mH	附加电阻 R_{g2}	0.5 Ω
LCL 滤波电容 C	1 000 μF	附加电抗器 L_{g1}	2 mH
阻尼电阻 R_d	0.15 Ω	附加电抗器 L_{g2}	6 mH

图 5 给出 SCR 大幅波动时,基于非特征次谐波注入辨识电网阻抗的模式切换仿真波形。该自适应过程包括 5 个时段,放大视图如图 6 所示。

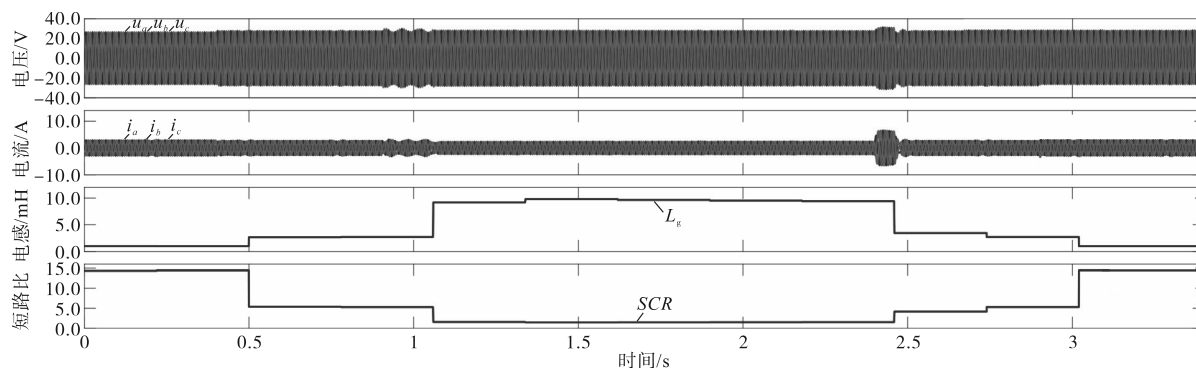


图5 基于非特征次谐波注入辨识电网阻抗的模式切换仿真波形

Fig.5 Simulation waveforms of mode switching based on non-characteristic subharmonic injection identification of grid impedance

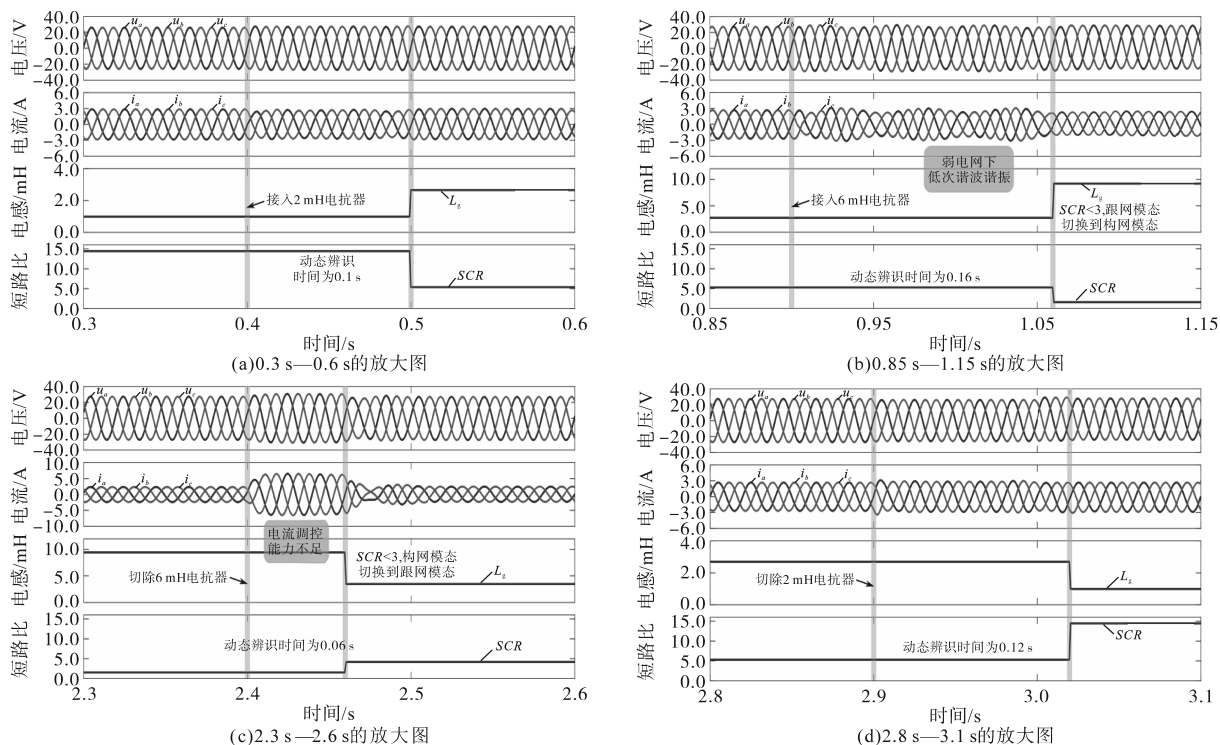


图6 仿真波动不同时间段的放大图

Fig.6 The zoom view of simulation waveforms at different time periods

具体的仿真过程描述如下:0 s—0.4 s:将1 mH电抗器接入系统,电网阻抗初始设定值为1 mH,此时模拟了强电网情况,并网变流器开始以传统跟网模式运行。由图6a仿真结果可知电网阻抗辨识值为0.992 mH,计算得出 $SCR=14.438$,稳态误差为0.8%验证了基于非特征谐波注入的阻抗辨识算法的准确性。强网下变流器工作在跟网模式具有良好的输出特性。

0.4 s—0.9 s:在0.4 s接入2 mH电抗器,此时电网阻抗为3 mH,此时 SCR 降低,模拟了跟网变流器在较弱的电网下运行情况。由图6a仿真结果可知电网阻抗辨识输出值为2.666 mH,对应 $SCR=5.373$,动态辨识时间为0.1 s,且在电网稍弱时跟网模式运行的变流器仍有较好的输出性能。

0.9 s—2.4 s:为了验证电网跟随型变流器在电网弱网下输出性能,在0.9 s接入6 mH电抗器,电网阻抗为9 mH。由仿真结果图6b可知工作在跟网模式的变流器输出电压、输出电流发生明显的低次谐波谐振现象。阻抗辨识输出值为9.187 mH,对应 $SCR=1.559<3$,动态辨识时间为0.16 s。变流器感知到电网变弱,从跟网模式自适应柔性切换到构网模式运行,低次谐波谐振现象消失,保障了变流系统在弱网下的稳定高效运行。

2.4 s—2.9 s:在2.4 s切除6 mH电抗器,电网阻抗恢复至为3 mH,模拟了强电网场景。由仿真结果图6c可知阻抗辨识输出值为3.442 mH,对应 $SCR=4.162>3$,动态辨识时间为0.06 s。强网下工作在构网模式下的并网变流器电流调控能力不

足,幅值波动大。并网变流器感知到电网变强,从构网模态切换柔性到跟网模态,输出电压、输出电流恢复稳定,保障了变流系统在强网下的稳定高效运行。

2.9 s—3.3 s:在2.9 s切除2 mH电抗器,电网阻抗恢复至为初始设定值1 mH,由仿真结果图6d可知电网阻抗辨识输出值为0.991 mH,对应 $SCR=14.453$,动态辨识时间为0.12 s,变流器输出电压电流仿真波形与0 s—0.4 s类似。

综上,基于非特征次谐波注入的电网阻抗辨识技术具有良好的动态性能,在电网阻抗变化时,能较快跟踪阻抗和 SCR 的实际设定值,跟-构网双模式自适应柔性切换控制策略,保障了并网变流器在电网强弱大幅度变化时的稳定运行。

4 结论

高渗透率分布式发电并网系统电网阻抗幅度波动大,变流器单一运行模式无法兼顾系统稳定裕度和能源利用率两个综合性能指标。本文依据跟网和构网模态控制性能的“互补”特性,提出了一种并网变流器双模式自适应柔性切换控制策略。首先,对两种工作模态控制策略进行分析,其次,基于非特征次谐波注入辨识电网阻抗,感知电网强度,自适应柔性切换工作模式,以保障并网变流器的稳定运行。仿真结果表明,所提方法能快速准确辨识电网阻抗,在电网强弱大幅度变化时,变流器实现双模式自适应柔性切换,保障了并网系统的稳定性和经济性。

参考文献

- [1] NANDA A K, PANDA B, PANIGRAHI C, et al. Trends in microgrid control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 5(4): 1905–1919, 2014.
- [2] 王晓阳, 赵晋斌, 朱宇昕. 多变流器并网系统小干扰稳定性分析综述[J]. 电气传动, 2022, 52(20): 3–10, 24.
WANG Xiaoyang, ZHAO Jinbin, ZHU Yuxin. Small-signal stability analysis of multiple-grid-connected-converter system: an overview[J]. Electric Drive, 2022, 52(20): 3–10, 24.
- [3] 黄现莲, 冯向东, 张新闻. PWM 装载模式对变流器弱电网适应能力的影晌[J]. 电气传动, 2020, 50(3): 22–27.
HUANG Xianlian, FENG Xiangdong, ZHANG Xinwen. Analysis of the effect of PWM loading mode on the converter's adaptability to the weak grid[J]. Electric Drive, 2020, 50(3): 22–27.
- [4] 吴恒, 阮新波, 杨东升. 弱电网条件下锁相环对LCL型并网变流器稳定性的影响研究及锁相环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5259–5268.
WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng. Research on the stability caused by phase-locked loop for LCL-type grid-connected inverter in weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5259–5268.
- [5] 王庆红, 谢晓华. 弱电网下并网变流器的带阻前馈控制策略研究[J]. 电气传动, 2019, 49(5): 44–48.
WANG Qinghong, XIE Xiaohua. Research on band-stop grid-voltage feedforward control strategy for grid-connected converter in weak grid condition[J]. Electric Drive, 2019, 49(5): 44–48.
- [6] 张惠丽, 方天治, 刘昊, 等. 弱电网下基于导纳合成相量法的单相并网变流器鲁棒性提升技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 35(30): 3213–3223.
ZHANG Huili, FANG Tianzhi, LIU Hao, et al. Technical investigation on robustness enhancement of single-phase grid-connected inverter based on synthesis-admittance-phasor scheme in weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 35(30): 3213–3223.
- [7] 石荣亮, 张兴, 徐海珍, 等. 基于自适应模式切换的虚拟同步发电机功率控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 127–137.
SHI Rongliang, ZHANG Xing, XU Haizhen, et al. The active and reactive power control of virtual synchronous generator based on adaptive mode switching[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 127–137.
- [8] 李臻博, 代林旺, 李少林, 等. 双馈风电机组电压源电流源双模式运行平滑切换控制策略[J]. 电气传动, 2022, 52(22): 13–20.
LI Zhenbo, DAI Linwang, LI Shaolin, et al. Control strategy for smooth switching between voltage source and current source in dual-mode operation of DFIG[J]. Electric Drive, 2022, 52(22): 13–20.
- [9] 李明, 张兴, 郭梓暄, 等. 弱电网下基于D分割法的变流器PI参数设计及稳定域分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 139–153.
LI Ming, ZHANG Xing, GUO Zixuan, et al. Proportional-integral parameter design for inverter based on D-partition method and its stability region analysis in weak grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 139–153.
- [10] LI M, ZHANG X, GUO Z, et al. Impedance adaptive dual-mode control of grid-connected converters with large fluctuation of SCR and its stability analysis based on D-partition method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 14420–14435.
- [11] LI M, ZHANG X, YANG Y, et al. The grid impedance adaptation dual mode control strategy in weak grid[C]//2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia), Niigata, Japan, 2018: 2973–2979.
- [12] 李明. 高渗透率新能源发电并网变流器阻抗自适应双模式控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
LI Ming. Research on impedance adaptive dual-mode control of

(下转第79页)

- (2):36-41.
- LIU Pengcheng, LI Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2):36-41.
- [14] 梅飞,陈子平,裴鑫,等. 基于矩阵算法的有源配电网故障定位容错方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(6):109-115.
- MEI Fei, CHEN Ziping, PEI Xin, et al. Fault-tolerant method for fault location of active distribution network based on matrix algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6):109-115.
- [15] XUE J K, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering, 2020(8):1, 22-34.
- [16] 甄永琦,蒋伟. 改进灰狼算法在配电网故障定位中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(11):200-205.
- ZHEN Yongqi, JIANG Wei. Application of improved grey wolf algorithm in distribution network fault location[J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(11):200-205.
- [17] 樊群才,胡箭,廖艳萍,等. 基于改进鲸鱼优化算法的分布式电源接入配电网继电保护的整定优化研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2):74-79.
- FAN Quncai, HU Jia, LIAO Yanping, et al. Research on setting optimization of relay protection for distributed power access based on improved whale optimization algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2):74-79.
- [18] 郑聪,周海峰,郑东强,等. 基于改进多元宇宙算法的主动配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2):169-179.
- ZHENG Cong, ZHOU Haifeng, ZHENG Dongqiang, et al. An active distribution network fault location method based on improved multi-universe algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2):169-179.

收稿日期:2024-06-07

修改稿日期:2024-07-01

(上接第50页)

- the grid-connected inverter for high-penetration new energy generation[D]. Hefei :Hefei University of Technology, 2020.
- [13] 黄河遥,王鲁杨,吴嘉明,等. 基于虚拟同步机的微电网不平衡工况下改进控制策略[J]. 电气传动, 2022, 52(14):45-51, 58.
- HUANG Heyao, WANG Luyang, WU Jiaming, et al. Improvement of control strategy based on virtual synchronous generator under unbalanced under unbalanced condition of microgrid[J]. Electric Drive, 2022, 52(14):45-51, 58.
- [14] 王晨丞,蒲丽娟,杜斌,等. 基于新型模糊自适应惯量VSG的微网频率波动抑制[J]. 电气传动, 2022, 52(5):14-20.
- WANG Chencheng, PU Lijuan, DU Bin, et al. Novel fuzzy adaptive inertia based virtual synchronous generator for microgrid frequency fluctuation attenuation[J]. Electric Drive, 2022, 52(5):14-20.
- [15] 李春,马凡,胡祺. 独立电力系统中基于模式切换的虚拟同步发电机控制方法[J]. 高压技术, 2022, 48(9):3474-3483.
- LI Chun, MA Fan, HU Qi. Virtual synchronous generator control method based on mode switching in Isolated power system [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9):3474-3483.

收稿日期:2023-10-09

修改稿日期:2023-11-16