

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

李臻博¹, 代林旺², 李少林², 张学广¹

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 目前双馈风电机组的主流控制方式为电流源型矢量控制方式,但其缺乏自主的频率与电压支撑能力,而电压源型虚拟同步机控制方式能解决上述缺点。为满足不同场景下电网工作要求,有必要研究双馈风电机组的控制模式切换问题。提出一种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,通过分析以上两种控制方式,使控制模式切换问题转变为保证电流内环输入与相位平滑切换问题。在此基础上,通过控制器状态跟随与数值缓启器的共同作用保证控制模式切换时相位与电流指令平滑切换,抑制双馈风电机组运行模式切换过程中的电流冲击与功率波动。最后,通过理论分析和仿真结果验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 双馈风电机组;平滑切换;双模式;虚拟同步机控制;矢量控制

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24417

Control Strategy for Smooth Switching Between Voltage Source and Current Source in Dual-mode Operation of DFIG

LI Zhenbo¹, DAI Linwang², LI Shaolin², ZHANG Xueguang¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology,

Harbin 150001, Heilongjiang, China; 2. China Electric Power Research

Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: At present the mainstream of doubly-fed induction generators (DFIG) control mode is the current source type vector control mode, which is lack of independent of frequency and voltage support ability, but the voltage source type virtual synchronous machine control method can solve the shortcomings. In order to meet the requirements of the grid work under different scenarios, it is necessary to study the control of the DFIG mode switches. A control strategy for smooth switch between voltage source and current source in dual-mode operation of DFIG was proposed. Firstly, by analyzing the above two control modes, the control mode switching problem was transformed into the problem of ensuring the current inner loop input and phase smooth switching. On this basis, the phase and current instructions could be smoothly switched during the control mode switching through the joint action of controller state following and numerical retarder, and the current shock and power fluctuation during the operation mode switching of DFIG were suppressed. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy was verified by theoretical analysis and simulation results.

Key words: doubly-fed induction generators (DFIG); smooth switching; dual-mode; virtual synchronous generator (VSG) control; vector control

双馈发电机是目前使用最为广泛的风力发电机型^[1-2]。双馈风电机组中技术成熟且广泛应用的控制方式是电流源型矢量控制方式^[3-5],其具

有有功无功解耦控制等优点,但不具备自主的频率、电压支撑能力。随着虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)技术的发展,电压源型虚

基金项目: 国家电网公司科技项目(4000-202114068A-0-0-00)

作者简介: 李臻博(1999—),男,硕士,Email: 13654687551@163.com

通讯作者: 张学广(1981—),男,博士,教授,Email: zxghit@hit.edu.cn

拟同步式双馈风电机组的研究受到广泛关注和重视^[6-10]。采用该控制方式下的双馈风电机组可以为电网提供惯量与阻尼,具有对电网电压与频率的支撑能力。带有电流内环的间接式虚拟同步机控制方式更便于工程上的应用。为了满足不同场景下电网工作要求,充分利用电力电子装置控制灵活性的优点,双馈风电机组应根据实际工况需求切换控制策略,但其切换时会产生较大电流冲击与输出功率波动,影响输出电能质量的问题。

国内外对控制模式切换问题已经展开了研究,但目前的研究主要集中于变流器。文献[11]提出一种将下垂控制与V/f控制相结合的混合控制策略,并利用状态跟随器的设计以实现变流器的平滑切换。文献[12]提出一种基于自适应功率补偿的无功-电压和有功-频率稳定控制策略,有效地抑制了负载对系统电压和频率的扰动,有利于平滑切换的实现。文献[13]提出了一种VSG的PQ模式,使并网状态下VSG能够实现恒功率运行,同时在动态过程中可以为系统提供惯量支撑,其稳态性能优于频率下垂模式,动态性能差于频率下垂模式。文献[14]提出了一种适用于并网工况的储能变流器虚拟同步机PQ模式控制策略,并提出了VSG的下垂模式与VSG的PQ模式的平滑切换方法,不过其控制本质仍然是电压源控制方式。文献[15-16]提出了一种基于控制器状态跟随的PQ控制与VSG控制的切换方法,但切换时间较长。文献[17]针对储能变流器在状态跟随切换的基础上提出将电流内环控制器改成线性自抗扰控制器,并设计一个状态观测器LESO实时在线观测扰动以补偿控制器,抑制切换过程中的电压电流波动,但增加了算法复杂度,不利于工程应用。文献[18]提出了一种通过相位与幅值预同步和电流环参考值跟踪的方法降低光伏逆变器模式切换时的电流冲击。文献[19]通过改进有功控制模块与无功控制模块提出一种VSG控制与PQ控制的切换方法,并通过小信号模型分析参数稳定性。文献[20]提出了一种双馈风力发电机电流源控制模式与混合型控制模式的切换方法。目前,控制模式切换策略的研究多是基于变流器,对于双馈风电机组的控制模式平滑切换策略研究较少,且双馈风电机组控制模式切换时需要考虑的因素较变流器更为复杂。

为此,本文首先分析了双馈风电机组的结构与控制策略,在此基础上提出了一种双馈风电机组电压源控制模式与电流源控制模式平滑切换

的控制策略。首先保证两种控制模式的电流内环结构与参数相同,同时通过控制器状态跟随与数值缓启器的共同作用使相位与电流环给定值在切换时平滑过渡。实现依据调度指令快速完成风电机组控制模式切换功能,并消除控制模式切换过程中的功率波动。最后,通过仿真分析验证了所提方法的有效性。

1 双馈风电机组结构与控制策略

1.1 双馈风电机组结构

图1为双馈风电机组拓扑连接图,风力机通过变速箱拖动双馈电机转子旋转,双馈电机定子直接接电网,转子通过背靠背变流器接入电网,双馈风电机组的控制策略都可以通过改变转子侧变流器的控制方法来实现。

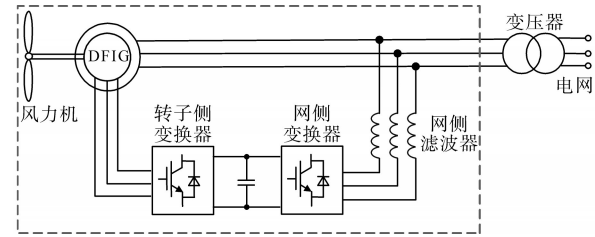


图1 双馈风电机组拓扑连接图

Fig.1 Topological connection diagram of DFIG

双馈风电机组网侧变流器始终采用矢量控制策略,通过改变转子侧变流器的控制策略即可让双馈风电机组运行在电压源控制模式或电流源控制模式下。

1.2 双馈风电机组矢量控制策略

双馈风电机组矢量控制策略通过功率外环与电流内环控制转子电压。功率外环控制方程为

$$\begin{cases} i_{rd_ref} = (k_{p0} + \frac{k_{i0}}{s})(P_{s_ref} - P_s) \\ i_{rq_ref} = -(k_{p0} + \frac{k_{i0}}{s})(Q_{s_ref} - Q_s) - u_{sd}/(\omega_s L_m) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{s_ref} , Q_{s_ref} , P_s , Q_s 分别为DFIG输出有功、无功功率的给定值和实际值; k_{p0} , k_{i0} 为功率环PI系数; L_m 为电机定子与转子之间的互感; u_{sd} 为定子电压d轴分量; ω_s 为定子电流角频率; i_{rd_ref} , i_{rq_ref} 分别为功率环输出的转子电流给定值的d,q轴分量。电流内环的控制方程为

$$\begin{cases} u_{rd} = (k_p^{ir} + \frac{k_i^{ir}}{s})(i_{rd_ref} - i_{rd}) - \omega_{sr} L_i i_{rq} - \omega_{sr} L_m i_{sq} \\ u_{rq} = (k_p^{ir} + \frac{k_i^{ir}}{s})(i_{rq_ref} - i_{rq}) + \omega_{sr} L_i i_{rd} + \omega_{sr} L_m i_{sd} \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_p^{ir}, k_i^{ir} 为电流环PI系数; L_r 为电机转子电感; ω_{sr} 为转子电角频率; u_{rd}, u_{rq} 分别为电机转子 d, q 轴电压; $i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}$ 分别为电机定、转子 d, q 轴电流。

通过功率外环控制转子电流,再利用转子电流控制转子电压。功率外环输出转子电流参考值,通过转子电流内环输出转子励磁电压。图2为双馈风电机组转子侧变换器矢量控制策略框图。

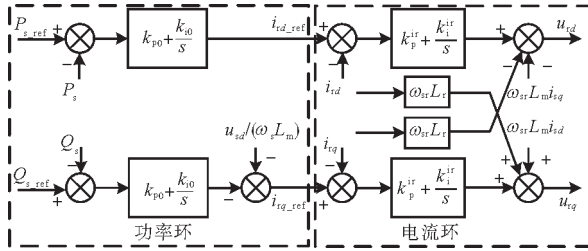


图2 矢量控制策略

Fig.2 Vector control strategy

1.3 双馈风电机组虚拟同步机控制策略

本文采用的是带定子电压转子电流级联内环控制的电压源型间接式虚拟同步机控制方式。虚拟同步外环控制方程为

$$\begin{cases} T_j \frac{d\omega}{dt} = P_{s_ref} - P_s - D(\omega - \omega_1) \\ \theta_s = \int \omega_b dt \\ u_s = u_{s_ref} + (k_{p0} + \frac{k_{i0}}{s})(Q_{s_ref} - Q_s) \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_j, D 分别为惯性和阻尼时间常数; ω_1 为转

子转速; ω 为虚拟角速度; ω_b 为电网角频率基准值; u_{s_ref} 为定子电压给定参考幅值; θ_s 为定子控制电压的相角; u_s 为定子控制电压的幅值。

虚拟同步机外环控制是通过有功功率偏差产生虚拟同步角频率、无功功率偏差产生定子电压幅值,然后将该幅值和频率按照矢量合成的方法直接产生定子电压 u_s 。虚拟同步机控制模式的电压内环控制方程为

$$\begin{cases} i_{rd_ref} = (k_p^{ur} + \frac{k_i^{ur}}{s})(u_{sq_ref} - u_{sq}) \\ i_{rq_ref} = -(k_p^{ur} + \frac{k_i^{ur}}{s})(u_{sd_ref} - u_{sd}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: k_p^{ur}, k_i^{ur} 为电压环PI系数; u_{sd_ref}, u_{sq_ref} 分别为虚拟同步机外环输出的定子电压给定值 d, q 轴分量; u_{sd}, u_{sq} 分别为电机定子电压 d, q 轴分量。

电压电流内环控制是通过定子电压转子电流双闭环来控制转子电压,电压电流内环中定子电压环的输出是转子电流参考值,转子电流环的输出是转子励磁电压,从而构建虚拟同步机控制到转子控制电压之间的桥梁。此外,矢量合成也是中间重要的环节,电压环输入信号中的定子电压 d, q 轴参考电压,可以通过信号合成及 Park 变换完成中间信号的转换。图3为双馈风电机组转子侧变换器虚拟同步机控制策略框图。

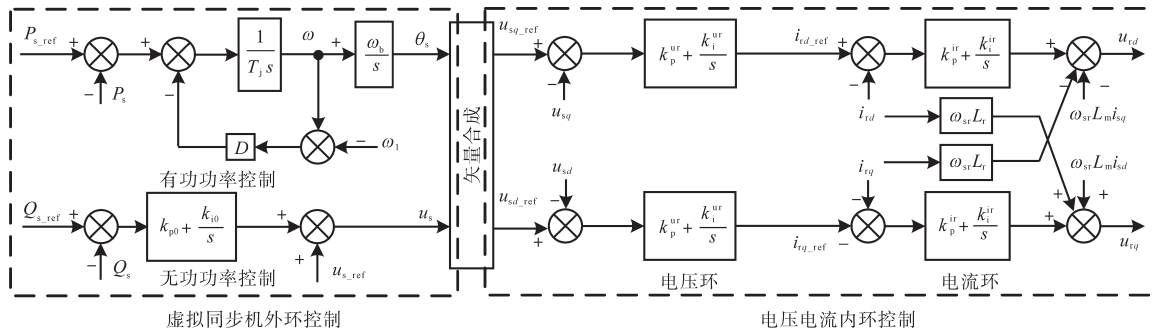


图3 虚拟同步机控制策略

Fig.3 Virtual synchronous generator control strategy

2 双馈风电机组结构与控制策略

本节将分析双馈风电机组在电压源型虚拟同步机控制模式与电流源型矢量控制模式间的平滑切换方法。在实际切换中发现,接收到运行模式切换指令后,若直接切换转子侧变流器输入,则风机会失稳崩溃。由第1节可知,双馈风电机组无论工作在电压源控制模式下还是在电流

源控制模式下,其电流内环都没有改变。因此本文在电流内环控制器前进行双模式切换,避免了上述问题。在双馈风电机组运行时,令电流内环、矢量控制下的功率外环与虚拟同步机控制下的电压外环、虚拟同步外环同时运行,根据系统指令决定双馈风电机组运行在何种控制模式下。因此保证双馈风电机组控制模式能稳定切换的关键在于使矢量控制的相位 θ_s 和电流环给定

$i_{rd_ref_PQ}^*$ 和 $i_{rq_ref_PQ}^*$ 分别与电压源型虚拟同步机控制的相位 θ_g 和电流环给定 $i_{rd_ref_VSG}^*$ 和 $i_{rq_ref_VSG}^*$ 在切换

时刻的平滑过渡。图4为双模式运行平滑切换方法整体示意图。

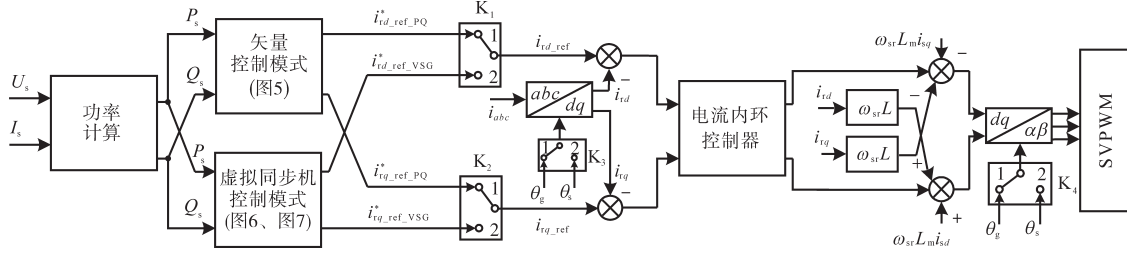


图4 双模式运行平滑切换方法整体示意图

Fig.4 Block diagram of smooth switching method in dual-mode operation

2.1 电压源/电流源控制模式切换

双馈风电机组矢量控制中功率外环切换控制框图、虚拟同步机控制中虚拟同步机外环切换控制框图和虚拟同步机控制中电压内环切换控制框图如图5~图7所示。

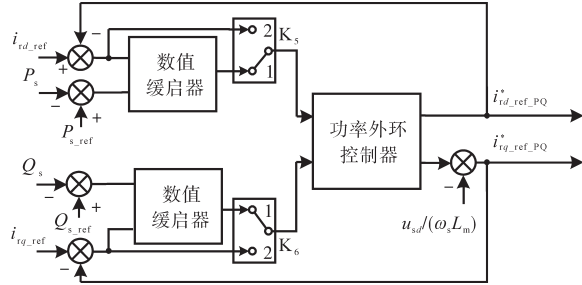


图5 矢量控制中功率外环切换控制框图

Fig.5 Power outer loop switching control

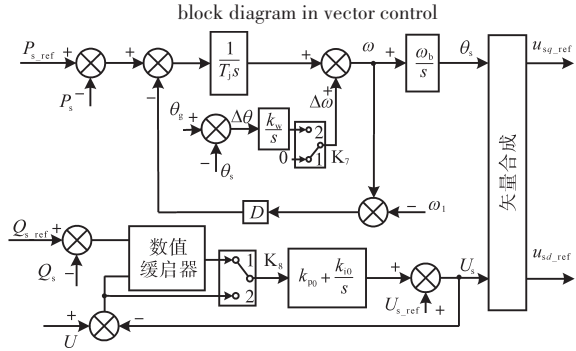


图6 虚拟同步机控制中虚拟同步机外环切换控制框图

Fig.6 Block diagram of VSG outer loop switching

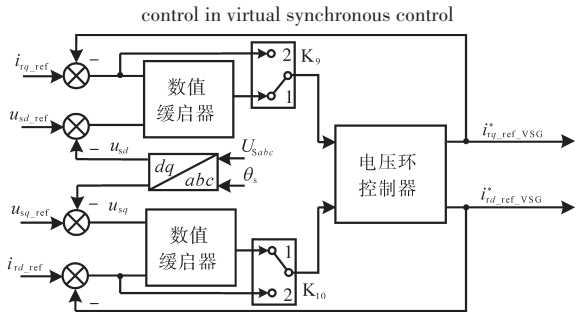


图7 虚拟同步机控制中电压内环切换控制框图

Fig.7 Block diagram of voltage inner loop switching control in virtual synchronous control

双馈风电机组控制模式切换的逻辑开关对应表如表1所示。

表1 逻辑开关对应表

Tab.1 Table of logical switch mappings

控制环节	逻辑开关名称	作用
电流内环	K_1, K_2	电流内环给定值切换
矢量控制下功率外环	K_5, K_6	消除转子电流给定值的切换波动
虚拟同步机外环	K_7, K_8	相位同步功能/消除定子电压给定值的切换波动
电压内环	K_9, K_{10}	消除转子电流给定值的切换波动
角度切换	K_3, K_4	相位切换功能

双馈风电机组由电压源运行模式切换至电流源控制模式控制时序如图8所示。

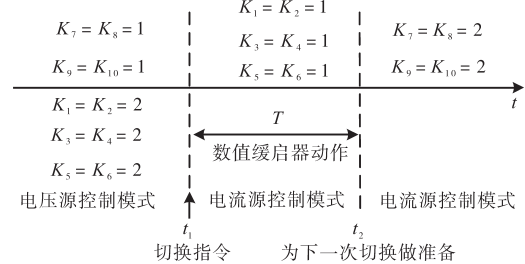


图8 电压源控制模式切换至电流源控制模式的控制时序

Fig.8 Control sequence for switching voltage source control mode to current source control mode

双馈风电机组以电压源控制模式运行时各开关状态为

$$\begin{cases} K_7 = K_8 = K_9 = K_{10} = 1 \\ K_1 = K_2 = K_3 = K_4 = K_5 = K_6 = 2 \end{cases}$$

双馈风电机组以VSG控制模式运行时,矢量控制中功率外环的逻辑开关 K_5, K_6 处于状态2,使矢量控制下有功功率环、无功功率环的控制器输出分别与VSG控制中电压环 q 轴控制器输出的电流内环 d 轴给定值、电压环 d 轴控制器输出的电流内环 q 轴给定值相等,即逻辑开关 K_1, K_2 处的状态1等于状态2,目的是为了消除虚拟同

步机控制切换为矢量控制时电流内环 d 轴、 q 轴给定值的波动。

t_1 时刻,接收到运行模式切换指令信号,此时,令 $K_1=K_2=K_3=K_4=K_5=K_6=1$ 。虽然已保证了功率外环控制器与电压环控制器在切换时刻输出状态一致,但矢量控制中有功环的逻辑开关 K_5, K_6 处状态1与状态2在切换时存在差值,此差值依然会造成双馈风电机组在切换时存在功率波动。为了完全消除控制模式切换时的功率波动,在接收到系统切换指令后,逻辑开关 K_5, K_6 前的数值缓启器分别获取逻辑开关 K_5, K_6 处数值 $K_{i,x}$ ($i=5, 6; x=1, 2$; 下标 i 代表位置编号,下标 x 代表状态编号)作为数值缓启器的输入,经过数值缓启器的调节,如下式:

$$K_i = K_{i-2} + \int_0^T \Delta K_i dt \quad (5)$$

其中

$$\Delta K_i = (K_{i-1} - K_{i-2})/T$$

式中: ΔK_i 为数值缓启器的设定步长; T 为动作时间。使逻辑开关 K_5, K_6 处由节点2平滑过渡到节点1,消除逻辑开关 K_5, K_6 处的切换波动。

需要说明的是,双馈风电机组以VSG控制并网运行时,其虚拟同步环输出相位 θ_s 被钳位为电网相位 θ_g ,即 $\theta_s = \theta_g$ 。在VSG切换成矢量控制时,相位的切换是无缝平滑的。

t_2 时刻,完成控制模式切换过程,此时双馈风电机组以电流源模式运行。为使本文的切换方法能进行电压源与电流源的往复切换能力,在电压源控制模式切换为电流源控制模式后,还需将逻辑开关 K_8, K_9, K_{10} 均选为状态2,保证矢量控制下的有功功率环输出与VSG电压环 q 轴输出相等、无功功率环输出与VSG电压环 d 轴输出相等,且将同步开关 K_7 选为状态2,使虚拟同步环的相位输出 θ_s 等于电网相位 θ_g ,为下一次的控制模式切换做准备。

2.2 电流源/电压源控制模式切换

双馈风电机组由电流源运行模式切换至电压源控制模式的控制时序如图9所示。

双馈风电机组以电流源控制模式运行时各开关状态为

$$\begin{cases} K_1 = K_2 = K_3 = K_4 = K_5 = K_6 = 1 \\ K_7 = K_8 = K_9 = K_{10} = 2 \end{cases}$$

当双馈风电机组以电流源控制模式运行时,VSG外环实际处于离网运行状态,其输出的电压

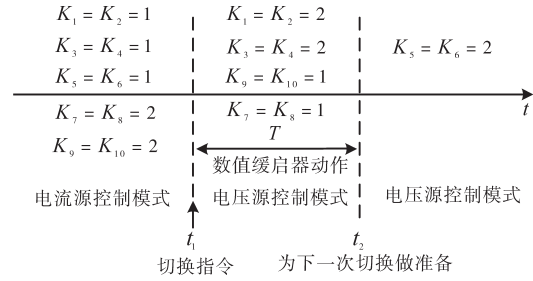


图9 电流源控制模式切换至电压源控制模式的控制时序

Fig.9 Control sequence for switching current source control mode to voltage source control mode

与电网电压之间可能存在相位偏差,导致控制模式切换时存在大的瞬时偏差,产生过大的冲击电流与功率波动,因此需要相位预同步单元将VSG外环输出的相位钳位为电网相位,即双馈风电机组以电流源模式运行时同步开关 K_7 处于状态2,虚拟同步环输出相位 θ_s 等于电网相位 θ_g 。在矢量控制切换为VSG控制时,将同步开关 K_7 置于状态1即可,从而保证相位的切换是无缝平滑的。

当双馈风电机组以矢量控制模式运行时,VSG控制中电压环的逻辑开关 K_9, K_{10} 处于状态2,使VSG控制下电压环 q 轴、 d 轴的控制器的输出分别与矢量控制中有功功率环控制器输出的电流内环 d 轴给定值、无功功率环控制器输出的电流内环 q 轴给定值相等,即逻辑开关 K_1, K_2 处的状态1等于状态2,消除矢量控制切换为VSG控制时电流内环 d 轴、 q 轴给定值的波动。

t_1 时刻,接收到运行模式切换指令信号,此时,令 $K_7=K_8=K_9=K_{10}=1, K_1=K_2=K_3=K_4=2$ 。虽然已保证了电压环控制器与功率外环控制器在切换时刻输出状态一致,但VSG控制中电压环 q 轴、 d 轴与VSG外环的无功环的逻辑开关 K_8, K_9, K_{10} 处状态1与状态2在切换时存在差值,此差值依然会造成双馈风电机组在切换时存在功率波动。为了完全消除控制模式切换时的功率波动,在接收到系统切换指令后,逻辑开关 K_8, K_9, K_{10} 前的数值缓启器获取逻辑开关 K_8, K_9, K_{10} 处数值 $K_{i,x}$ ($i=8, 9, 10; x=1, 2$, 下标 i 代表位置编号,下标 x 代表状态编号)作为数值缓启器的输入,经过数值缓启器的调节,如下式:

$$K_i = K_{i-2} + \int_0^T \Delta K_i dt \quad (6)$$

使逻辑开关 K_8, K_9, K_{10} 处由节点2平滑过渡到节点1,消除逻辑开关 K_8, K_9, K_{10} 处的切换波动。

t_2 时刻,完成控制模式切换过程,此时双馈风电机组以电压源模式运行。为使本文的切换方法

能进行电流源与电压源的往复切换能力,在电流源控制模式切换为电压源控制模式后,还需将逻辑开关 K_5, K_6 选为状态2,保证VSG控制下的电压环 q 轴与有功功率环输出相等、电压环 d 轴与无功功率环输出相等,为下一次的控制模式切换做准备。

3 仿真验证与分析

为了验证本文所提的电压源电流源双模式运行切换控制策略的有效性,利用仿真软件以2.1 MW风电机为例进行仿真分析。电机与电网

主要电气参数为:DFIG额定电压 $V=690$ V,DFIG基准容量 $S=2.1$ MV·A,额定频率 $f=50$ Hz,转子漏感 $L_{lr}=0.5152$ (标么值),定子漏感 $L_{ls}=0.2938$ (标么值),转子电阻 $R_r=0.0194$ (标么值),定子电阻 $R_s=0.0238$ (标么值),励磁电感 $L_M=14.8411$ (标么值),直流母线电压 $V_{dc}=1080$ V,电网电感 $L_g=7.2165 \times 10^{-4}$ H,电网电阻 $R_g=0.01135 \Omega$ 。

3.1 电压源/电流源控制模式切换仿真结果与分析

图10给出了双馈风电机组由电压源控制模式切换为电流源控制模式的仿真波形。

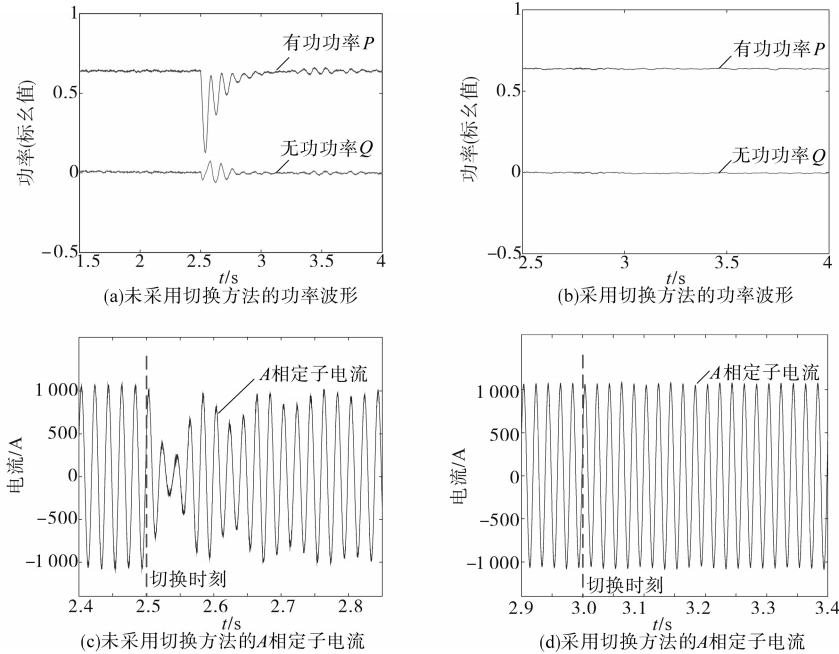


图10 系统由电压源控制模式切换至电流源控制模式的仿真波形

Fig.10 Simulation waveforms of system switching from voltage source control mode to current source control mode

仿真功率给定为:双馈风电机组输出的有功功率设为0.64(标么值),输出无功功率为0。因控制模式切换时若直接切换转子侧变换器的开关给定则风机会完全失稳,所以从图10a、图10c可以看出,未采用切换方法时双馈风电机组先以电压源控制模式运行,在2.5s时切换为电流源控制模式,切换时功率波动极大,会对设备产生不利影响;从图10b、图10d可以看出, $t=3$ s时接收到控制模式切换指令,令 $K_1=K_2=K_3=K_4=K_5=K_6=1$, $t=3.3$ s时完成模式切换,由于在切换前保证了功率外环控制器与电压环控制器在切换时刻输出状态一致,在切换时又采用数值缓启器消除波动,两者共同作用极大地消除了切换时的功率波动,实现了控制模式切换时电流与功率的平滑切换。

3.2 电流源/电压源控制模式切换仿真结果与分析

图11给出了双馈风电机组由电流源控制模

式切换为电压源控制模式的仿真波形。

仿真功率给定为:双馈风电机组输出的有功功率设为0.64(标么值),输出无功功率设为0。因控制模式切换时若直接切换转子侧变换器的开关给定则风机会完全失稳,所以从图11a、图11c可以看出,未采用切换方法时,双馈风电机组先以电流源控制模式运行,在2s时切换为电压源控制模式,切换时功率波动极大,会对设备产生不利影响;从图11b、图11d可以看出, $t=3$ s时接收到控制模式切换指令,令 $K_7=K_8=K_9=K_{10}=1$, $K_1=K_2=K_3=K_4=2$, $t=3.3$ s时完成模式切换,可见,由于在切换前保证了相位一致及电压环控制器与功率外环控制器在输出状态一致,在切换时又采用数值缓启器消除波动,两者共同作用极大地消除了切换时的功率波动,实现了控制模式切换时电流与功率的平滑切换。

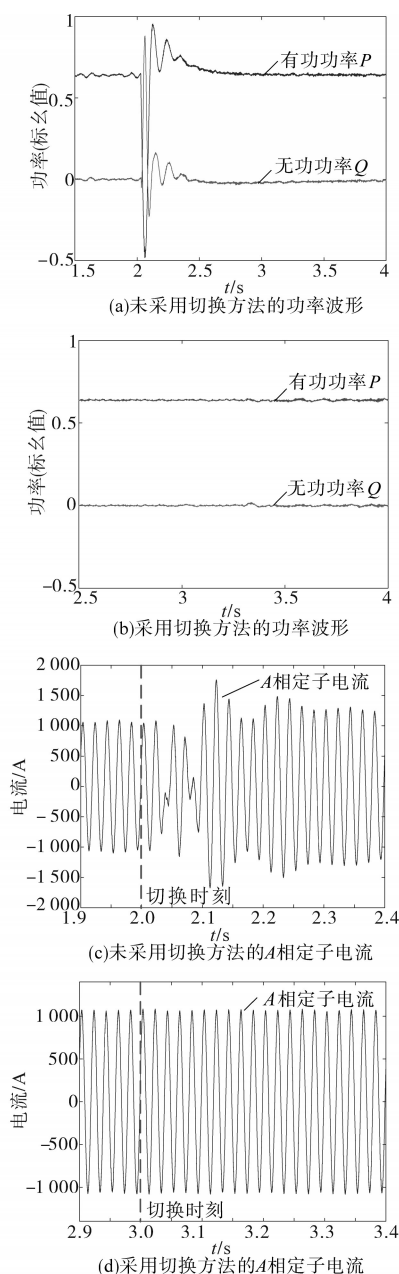


图11 系统由电流源控制模式切换至电压源控制模式的仿真波形

Fig.11 Simulation waveforms of system switching from current source control mode to voltage source control mode

4 结论

本文针对双馈风电机组控制模式切换时产生较大电流冲击与输出功率波动问题,提出了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。在对矢量控制策略与虚拟同步机控制策略分析的基础上,提出了通过保证电流内环不变,使控制模式切换问题转变为保证电流内环输入与相位平滑切换问题。通过分析两种控制模式切换时的波动根源,提出控制器状态跟随与数值缓启器的共同作用使得控制模式切换时相

位与电流指令平滑切换方法。通过搭建仿真模型,验证了所提方法极大地减小了切换时的功率波动,实现了双馈风电机组的双模式运行平滑切换功能。

参考文献

- [1] 肖云鹏,王锡凡,王秀丽,等. 面向高比例可再生能源的电力市场研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 663-674.
Xiao Yunpeng, Wang Xifan, Wang Xiuli, *et al.* Review on electricity market towards high proportion of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 663-674.
- [2] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特点[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904.
Zhou Xiaoxin, Chen Shuyong, Lu Zongxiang, *et al.* Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.
- [3] 贺益康,胡家兵. 双馈异步风力发电机并网运行中的几个热点问题[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27): 1-15.
He Yikang, Hu Jiabing. Several hot-spot issues associated with the grid-connected operations of wind-turbine driven doubly fed induction generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(27): 1-15.
- [4] 郎永强,张学广,徐殿国,等. 双馈风电场无功功率分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 77-82.
Lang Yongqiang, Zhang Xueguang, Xu Dianguo, *et al.* Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 77-82.
- [5] 张学广,徐殿国,潘伟明,等. 基于电网电压定向的双馈风力发电机灭磁控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 95-99.
Zhang Xueguang, Xu Dianguo, Pan Weiming, *et al.* A flux damping control strategy of doubly-fed induction generator based on the grid voltage vector oriented[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 95-99.
- [6] 柴建云,赵杨阳,孙旭栋,等. 虚拟同步发电机技术在风力发电系统中的应用与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 17-25.
Chai Jianyun, Zhao Yangyang, Sun Xudong, *et al.* Application and prospect of virtual synchronous generator in wind power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 17-25.
- [7] Wang S, Hu J, Yuan X. Virtual synchronous control of grid-connected DFIG-based wind turbines[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 932-944.
- [8] Zhong Q C, Ma Z, Ming W L, *et al.* Grid-friendly wind power systems based on the synchronverter technology[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89(1): 719-726.
- [9] 李少林,王伟胜,张兴,等. 风力发电对系统频率影响及虚拟

- 惯量综合控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 64-73.
- Li Shaolin, Wang Weisheng, Zhang Xing, *et al.* Impact of wind power on power system frequency and combined virtual inertia control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 64-73.
- [10] 张学广, 付志超, 陈文佳, 等. 弱电网下考虑锁相环影响的并网逆变器改进控制方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 139-145.
- Zhang Xueguang, Fu Zhichao, Chen Wenjia, *et al.* An improved control method for grid-connected Inverters considering impact of phase-locked loop under weak grid condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 139-145.
- [11] 田梁玉, 唐忠, 田晨, 等. 基于状态跟随器的微电网平滑切换研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1285-1290.
- Tian Liangyu, Tang Zhong, Tian Chen, *et al.* Research of microgrid seamless switching based on state follower[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1285-1290.
- [12] 许胜, 曹武, 赵建峰. 微网稳定运行与模式平滑切换综合控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3855-3867.
- Xu Sheng, Cao Wu, Zhao Jianfeng. An integrated control strategy of the stabilization operation and mode smooth transfer for microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(16): 3855-3867.
- [13] 颜湘武, 贾焦心, 王德胜, 等. 虚拟同步发电机的并网功率控制及模式平滑切换[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 91-99.
- Yan Xiangwu, Jia Jiaoxin, Wang Desheng, *et al.* Power control and smooth mode switchover for grid-connected virtual synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 91-99.
- [14] 温春雪, 阳春来, 陈丹, 等. 虚拟同步储能变换器的功率双模式控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 56-60.
- Wen Chunxue, Yang Chunlai, Chen Dan, *et al.* Power-loop dual-mode control of virtual synchronous energy storage converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 56-60.
- [15] 石荣亮, 张兴, 徐海珍, 等. 基于虚拟同步发电机的微网运行模式无缝切换控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 16-23.
- Shi Rongliang, Zhang Xing, Xu Haizhen, *et al.* Seamless switching control strategy for microgrid operation modes based on virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 16-23.
- [16] 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.
- [17] 朱作滨, 黄绍平. 基于VSG微网储能变流器无缝切换控制策略研究[J]. 控制工程, 2021, 28(3): 488-494.
- Zhu Zuobin, Huang Shaoping. Research on seamless switching control strategy of microgrid power converter system based on VSG[J]. Control Engineering of China, 2021, 28(3): 488-494.
- [18] 李明, 张兴, 郭梓暄, 等. 弱电网下基于电网阻抗自适应的双模式并网稳定控制策略[J]. 太阳能学报, 2021, 42(7): 86-93.
- Li Ming, Zhang Xing, Guo Zixuan, *et al.* Grid impedance adaption dual mode grid-connected stability control strategy in a weak grid[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(7): 86-93.
- [19] 缪惠宇, 杨赞, 梅飞, 等. 一种虚拟同步机运行模式平滑切换控制策略[J]. 太阳能学报, 2020, 41(9): 121-128.
- Liao Huiyu, Yang Yun, Mei Fei, *et al.* Aseamless mode switching control strategy in virtual synchronous generator[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(9): 121-128.
- [20] 谢震, 许可宝, 高翔, 等. 弱电网下基于混合控制型双馈风电机组稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(20): 7426-7439.
- Xie Zhen, Xu Kebao, Gao Xiang, *et al.* Stability analysis of doubly-fed wind turbines based on hybrid control in weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20): 7426-7439.

收稿日期: 2022-06-10

修改稿日期: 2022-07-11