

电压单相跌落下 VSG 输出平衡电流控制策略^{*}

咸瑞雪¹, 韩子娇^{1,2}, 董雁楠¹, 蔡志远¹

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 电网发生单相电压跌落会造成双馈风机变换器输出电流不平衡、冲击电流过大。传统虚拟同步控制策略以理想电压为基础建模, 无法应对电压负序分量与正序分量耦合的情况, 将直接影响电流环和脉冲宽度调制信号输出的稳定性。针对这一问题, 提出了解耦双同步坐标系下基于单相 Park 变换的虚拟同步控制策略 (DDSRF-VSG-Spark)。首先, 通过解耦双同步参考坐标系实现正序分量与负序分量的解耦, 然后采用单相 Park 变换技术实现脉冲宽度调制信号和电流的稳定输出。最后, 通过仿真对比验证, 电网电压单相跌落期间, DDSRF-VSG-Spark 能够保证系统的稳定运行。

关键词: 双馈风机; 虚拟同步机; 解耦双同步参考坐标系; 单相 Park 变换

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)10-0039-07

doi: 10.12177/emca.2023.119

Virtual Synchronous Generator Output Balance Current Control Strategy Under Single-Phase Voltage Drop^{*}

XIAN Ruixue¹, HAN Zijiao^{1,2}, DONG Yannan¹, CAI Zhiyuan¹

(1. College of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110004, China)

Abstract: Single-phase voltage drop in the grid will cause the unbalanced output current and the large impulse current of doubly-fed induction generator (DFIG). The traditional virtual synchronous generator (VSG) control strategy is modeled on the basis of ideal voltage, which cannot cope with the coupling of negative and positive sequence component of voltage. It will directly affect the stability of current loop and pulse width modulation signal output. Aiming at this problem, a virtual synchronous control strategy based on single-phase Park transformation in decoupled dual synchronous coordinate system (DDSRF-VSG-Spark) is proposed. Firstly, the positive and negative sequence component are decoupled by decoupling the double synchronous reference frame. Then the single-phase Park transformation technology is used to realize the stable output of pulse width modulation signal and current. Finally, through simulation comparison, it is verified that DDSRF-VSG-Spark can ensure the stable operation of the system during single-phase grid voltage drop.

Key words: doubly-fed induction generator; virtual synchronous generator; decoupled dual synchronous reference frame; single-phase Park transformation

0 引言

双馈风机以其体积小、效率高等特点在风力

发电市场占据较大份额^[1-2]。虚拟同步控制策略能够提高双馈风机惯性和阻尼支撑而被风力发电系统广泛使用^[3-4]。在实际运行中, 电网存在电气

收稿日期: 2023-04-27; 收到修改稿日期: 2023-06-30

^{*} 基金项目: 国网辽宁省电力有限公司科技项目(2021YF-81)

作者简介: 咸瑞雪(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为风力发电系统并网技术。

蔡志远(1962—), 男, 教授, 博导, 研究方向为智能电器、新能源发电技术。(通信作者)

化铁路带负荷或单相故障时将会造成电网电压发生某一相幅值跌落(单相故障 70%, 两相接地 15%, 相间故障 10%, 三相 5%)^[5-6]。电网电压单相跌落会导致虚拟同步控制下的双馈风机变换器输出电流不平衡、承受冲击电流过大、双馈风机出力降低及安全运行等问题^[7-8]。

根据国际电工委员会(IEC)标准,三相异步电机输出电流不平衡度的标准应不大于 10%, 变换器能承受的最大电流为 2 p.u.^[9-11]。目前,针对电流不平衡的情况大多采用的是补偿输出的方式,其更适用于电流控制型变换器,不能直接用于电压控制型变换器。本文分析得知电网电压单相跌落时将会导致传统虚拟同步控制的坐标变换过程中存在负序分量与正序分量耦合,影响电流环和脉宽调制信号的输出,进而导致变换器输出电流不平衡。因此,如何抑制或消除电网电压单相跌落时负序分量对虚拟同步控制的双馈风机变换器输出的影响是一个亟需解决的问题。文献[12]提出了一种针对多逆变器稳定并网的策略,但该策略是针对稳态电网中的情况,对于单相电网电压跌落的情况适配度较低。文献[13]提出了一种在虚拟同步控制策略的基础上加入谐振控制器的控制策略,通过准比例谐振控制器产生的负序电压来实现平衡电流的目的,但该方法较为复杂,且在精度方面无法保证。文献[14-15]提出了一种在网侧加装一台谐振控制逆变器的方法,在面对电网电压发生跌落时通过对双馈风机的网侧逆变器进行相应的输出补偿,该方案能实现精准控制但系统庞大,经济性较差。文献[16]采用在电网发生故障期间更换控制策略的方法,实现了虚拟同步控制和传统电压发生跌落时控制策略的平滑转换。但在转换后也将会失去对电网提供惯性和阻尼支撑的能力,不再具有类似同步机的外特性。文献[17]提出了一种解耦双同步坐标系的方法来实现电压畸变时并网逆变器电压正序分量的提取,对后续研究有指导性作用。文献[18]提出了利用并联双二阶广义积分器(DSOGI)的方法实现对谐波的分频检测,但对于电网电压单相跌落时输出控制效果不理想。

针对电网电压单相跌落时虚拟同步控制的双馈风机输出电流不平衡的问题,本文提出解耦双同步坐标系下基于单相 Park 变换的虚拟同步控

制策略(DDSRF-VSG-Spark)。首先,通过解耦双同步参考坐标系实现电网电压中提取准确的正序分量;其次,采用三相电流单相 Park 变换的控制方法输出准确的空间矢量脉宽调制信号;最后,输出平衡的电流。

1 电网电压单相跌落特性分析

风机并网容量在逐年攀升的同时也会带来电网惯性支撑能力减弱的问题,为保证电网在面对扰动时安全稳定的运行,需要双馈风力发电系统能够在满足自身安全的前提下具有支撑电网的能力。图 1 为双馈风力发电系统结构图。

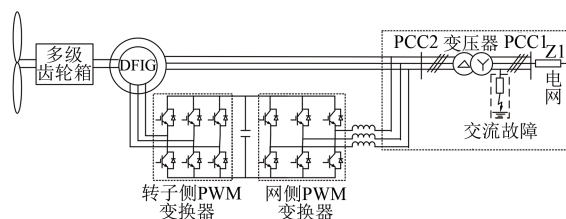


图 1 双馈风力发电系统结构图

电网电压发生单相跌落,从发电机的角度来看是定子电压突变的过渡过程。假设电压跌落的幅度以跌落系数 k 来表示,即电网电压跌落至 50% 时, $k=0.5$ 。本文假定在电网电压发生跌落时转子侧的励磁电压不变,进而可以认为电网电压跌落的工况是稳态运行和 $(k-1)$ 倍电压的叠加。

稳定运行时,以电压跌落前电网电压为参考相量,进而得到变换后电压列向量,表达式如下:

$$\mathbf{V}_{w0} = [0 \quad 1 \quad v_{d0} \quad v_{q0}]^T \quad (1)$$

此时定转子电流都为常数,可以得到两相静止坐标系下的定子电流。本文采用标幺值进行计算,转子电流和定子电流幅值相等,相位相差 180° ,故本文仅对定子侧电流分析,表达式如下^[19-20]:

$$\begin{cases} i_{ds0}(t) = \frac{bL_M(av_{d0} + sv_{q0}) - s^2r_2 - abr_2}{bL(a^2 + s^2)} \\ i_{qs0}(t) = \frac{bL_M(-sv_{d0} + av_{q0}) - r_2sa + bsr_2}{bL(a^2 + s^2)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $a = L_sr_2/L$; $b = r_2/L_r$; i_{ds0} 、 i_{qs0} 和 v_{d0} 、 v_{q0} 分别为稳态时 d 轴和 q 轴的电流和电压, L_r 、 L_s 和 L_M 分别为转子定子的自感和互感; s 为倍频分量。

以 A 相电流为例,定子电流经过坐标逆变换可得定子电流时域表达式如下:

$$\begin{cases} i_A = A_1 \sin t + B_1 \cos t \\ A_1 = \frac{-abL_m u_{dr} - bL_m s u_{qr} + c}{(a^2 + s^2)bL} \\ B_1 = \frac{bc s u_{dr} - abc u_{qr} + d}{(a^2 + s^2)bL} \\ c = r_2(ab + s^2) \\ d = sr_2(a - b) \end{cases} \quad (3)$$

当 DFIG 系统中电网发生单相跌落, 即与 $(k-1)$ 倍电压进行叠加后, 在两相静止坐标系下电压列向量为

$$\mathbf{V}_{w1} = [0 \quad (k-1) \quad v_{dr1} \quad v_{qr1}]^T \quad (4)$$

进而通过分析可得到两相静止坐标系下定子电流时域的解^[21]:

$$\begin{aligned} i_{ds1} = & [A_{ds1} \sin(st) + B_{ds1} \cos(st)] e^{-at} + \\ & (C_{ds1} \sin t + D_{ds1} \cos t) + \\ & [E_{ds1} \sin(2t) + F_{ds1} \cos(2t)] + G_{ds1} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} i_{qs1} = & [A_{qs1} \sin(st) + B_{qs1} \cos(st)] e^{-at} + \\ & (C_{qs1} \sin t + D_{qs1} \cos t) + \\ & [E_{qs1} \sin(2t) + F_{qs1} \cos(2t)] + G_{qs1} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $A_{ds1} - G_{ds1}, G_{qs1} - G_{qs1}$ 为电压单相跌落下, 定子经过逆变换后在两项静止坐标系下的系数矩阵。

由式(5)和式(6)不难得出, 在加上反向电压模拟电网电压单相跌落时, 两相坐标系下定子电流中存在衰减的 s 倍频分量、基波分量、直流分量以及二倍频分量。通过式(2)可知, 稳态时的定子电流为直流, 运用叠加定理并将其转换至三相坐标系时, 定子三相电流如下:

$$i_A(t) = A_1 \sin[(1-s)t] + A_2 \cos[(1-s)t] e^{-at} + (A_3 \sin t + A_4 \cos t) + A \quad (7)$$

$$i_B(t) = B_1 \sin[(1-s)t] + B_2 \cos[(1-s)t] e^{-at} + (B_3 \sin t + B_4 \cos t) + B \quad (8)$$

$$i_C(t) = C_1 \sin[(1-s)t] + C_2 \cos[(1-s)t] e^{-at} + (C_3 \sin t + C_4 \cos t) + C \quad (9)$$

由式(7)~式(9)可以看出, 当电网发生 A 相电压跌落时, 定子的三相电流存在三种电流分量, 且与电压跌落系数 k 有关。

2 解耦双同步坐标系下基于单相 Park 变换的虚拟同步控制策略建模

2.1 DDSRF-VSG-Spark 正负序分离策略建模

在电网电压发生单相跌落时对基波分量使用

对称分量法, 对基波分量中的正序分量和负序分量分别建立同步坐标系^[22]。以正序分量相角 θ_1 建立 dq_1 参考坐标系, 以负序分量相角 θ_2 建立的 dq_2 参考坐标系, 正序与负序分量相角相反。将不对称电压分别投射在正序分量参考坐标和负序分量参考坐标上。非归一化 Clark 变换后电压分量表达式如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{\alpha\beta} = \mathbf{V}_{\alpha\beta 1} + \mathbf{V}_{\alpha\beta 2} = \\ V_1 \begin{bmatrix} \cos\phi_1 \\ \sin\phi_1 \end{bmatrix} + V_2 \begin{bmatrix} \cos(-\omega t + \phi_2) \\ \sin(-\omega t + \phi_2) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

通过分析可知, $\theta_1 = \omega t$ 时正序参考坐标系的相角位置和电压的正序分量角度相同, 可知在两个参考坐标系中电压分量的表达式如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{dq1} = \begin{bmatrix} V_{d1} \\ V_{q1} \end{bmatrix} = [\mathbf{T}_{dq1}] \mathbf{V}_{\alpha\beta} = \\ V_1 \begin{bmatrix} \cos\phi_1 \\ \sin\phi_1 \end{bmatrix} + V_2 \begin{bmatrix} \cos(-2\omega t + \phi_2) \\ \sin(-2\omega t + \phi_2) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{dq2} = \begin{bmatrix} V_{d2} \\ V_{q2} \end{bmatrix} = [\mathbf{T}_{dq2}] \mathbf{V}_{\alpha\beta} = \\ V_1 \begin{bmatrix} \cos(2\omega t + \phi_1) \\ \sin(2\omega t + \phi_1) \end{bmatrix} + V_2 \begin{bmatrix} \cos\phi_2 \\ \sin\phi_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

通过坐标变换和理论分析可知:

$$[\mathbf{T}_{dq1}] = [\mathbf{T}_{dq2}]^T = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: ϕ_1 和 ϕ_2 分别为正序分量和负序分量在其相应参考坐标系内的相角; V_1 和 V_2 分别为输入信号正负序分量 V_{dq1} 和 V_{dq2} 的幅值。

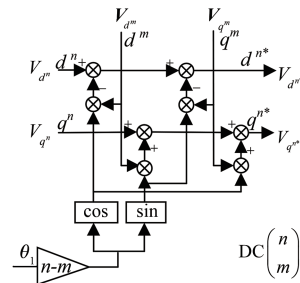


图2 去耦控制框图

由式(12)和式(13)可知, 两旋转坐标系的耦合项可以通过前馈分量消除, 进而消除对系统稳定的影响。采用如图2所示的去耦单元, 通过对 m, n 取值的不同来实现正序分量和负序分量的解

耦。当 $n=+1, m=-1$ 时, 实现正序分量在负序分量上的解耦; 同理可得 $n=-1, m=+1$ 时, 可以实现负序分量在正序分量上的解耦, 从而得到基频正负序分量。

有功-频率控制环传递函数如下:

$$G_{\text{DDSRF-VSG}} = \frac{3VV_{\text{w}}/Z_{\text{w}}}{J\omega_0 S^2 + D\omega_0 S + 3VV_{\text{w}}/Z_{\text{w}}} \quad (14)$$

式中: J 为转动惯量; D 为阻尼系数; ω_0 为额定角速度; V 为 VSG 输出电压; V_{w} 为电网电压; Z_{w} 为系统等效电压。

图 3 为 DDSRF-VSG 的系统伯德图, 通过伯德图分析可知, 在 $L(w) \geq 0$ 的频率范围内, 相频特性不和 $-\pi$ 相交, 故系统稳定。

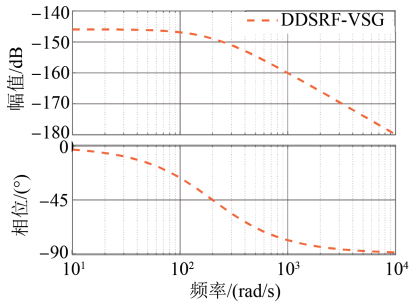


图 3 DDSRF-VSG 系统伯德图

2.2 DDSRF-VSG-Spark 单相 Park 变换建模

在电网电压发生单相跌落时, 会造成双馈风机脉冲宽度调制 (PWM) 信号输出存在波动的情况。本文在三相瞬时无功功率理论的基础上提出 VSG-单相电流独立控制策略, 以满足准确实时输出稳定的 PWM 信号的目的^[23]。

在 $\alpha\beta$ 坐标平面上矢量 $v_{\text{w}\alpha}$ 、 $v_{\text{w}\beta}$ 和 $i_{\text{w}\alpha}$ 、 $i_{\text{w}\beta}$ 分别合成电压电流矢量 v 和 i , 如图 4 所示。

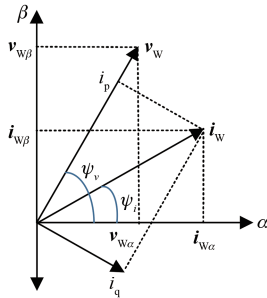


图 4 $\alpha\beta$ 坐标系中的电压电流矢量

$$v_{\text{w}} = v_{\text{w}\alpha} + v_{\text{w}\beta} = v_{\text{w}} \angle \psi_v \quad (15)$$

$$i_{\text{w}} = i_{\text{w}\alpha} + i_{\text{w}\beta} = i_{\text{w}} \angle \psi_i \quad (16)$$

设三相电路的电压电流瞬时值为 v_{wa} 、 v_{wb} 、 v_{wc}

和 i_{wa} 、 i_{wb} 、 i_{wc} , 将其转换到三相正交的 $\alpha\beta$ 坐标系中, 其表达式如下:

$$\begin{bmatrix} v_{\text{w}\alpha} \\ v_{\text{w}\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\text{wa}} \\ v_{\text{wb}} \\ v_{\text{wc}} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\text{w}\alpha} \\ i_{\text{w}\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\text{wa}} \\ i_{\text{wb}} \\ i_{\text{wc}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$n_{\text{w}} = n_{\text{w}\alpha} + n_{\text{w}\beta} = n_{\text{w}} \angle \psi_n (n = v, i) \quad (19)$$

三相瞬时有功电流 i_{p} 和无功电流 i_{q} 为电流矢量在电压矢量上面的投影。

由三相引申至单相, 在单相电路中, $i_{\text{a}} \neq 0$, $i_{\text{b}} = 0$, $i_{\text{c}} = 0$, 从而可知 $i_{\alpha} = i_{\beta}$ 。

$$i_{\text{a}} = -i_{\alpha} - \frac{1}{2}i_{\beta} - \frac{1}{2}i_{\gamma} \quad (20)$$

在单相电路中的 $\alpha\beta$ 坐标系中, 电流的瞬时值 i_{α} 为 α 轴上面的投影。从 $\alpha\beta$ 坐标系的基础理论可得, β 轴垂直于 α 轴且超前 90° , 则有 i_{α} 滞后于 i_{β} 90° , 进而可以得到:

$$i_{\beta} = i_{\alpha} \angle 90^\circ \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \angle 90^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ i \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中: i_{α} 和 i_{β} 分别为 $\alpha\beta$ 坐标系中 α 轴和 β 轴的电流分量; i 代表单相电路的电流值。

图 5 为系统整体控制框图, 系统由双馈风机网侧变换器、线路电阻电感、滤波电容和电网组成。双馈风机网侧变换器采用虚拟同步控制策略使其具有惯性和阻尼支撑, 进而采用解耦双同步坐标系和单相 Park 变换技术实现变换器在低压期间能够输出平衡电流, 并稳定地并网运行。

3 仿真结果分析

变换器能承受的最大电流为 2 p.u., 且输出电流平衡度不超过 10%。通过理论分析搭建 DDSRF-VSG-Spark 下的双馈风机仿真模型, 在 MATLAB/Simulink 仿真环境下与传统虚拟同步控制策略进行对比验证, 具体的仿真参数如表 1 所示, 仿真结果如图 6~图 8 所示。

仿真采用解耦双同步坐标系下虚拟同步单相

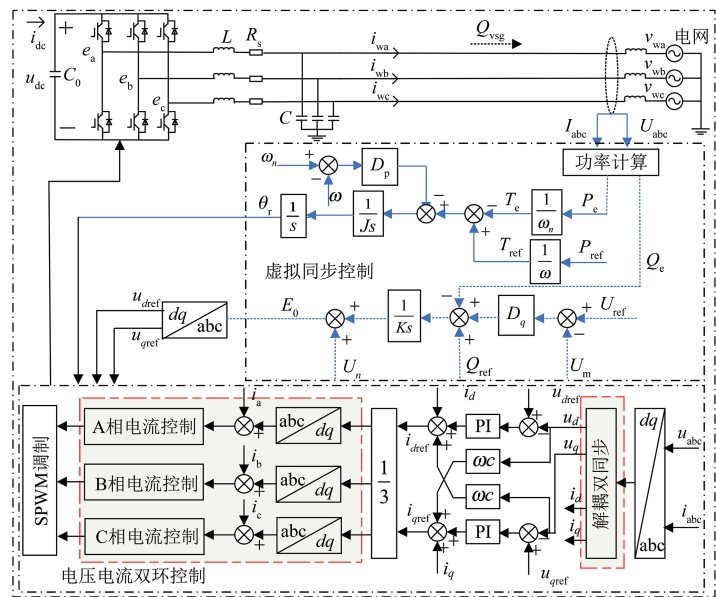


图 5 整体控制框图

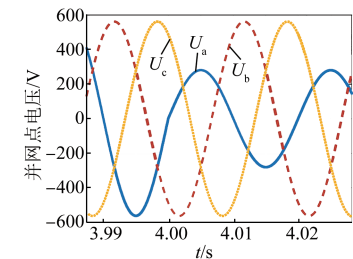
表 1 双馈风机并网逆变器控制参数表

参数名称	参数值
U^*/V	690
f^*/Hz	50
U_{dc}/V	1200
最大风速/ $(m \cdot s^{-1})$	12
最大风能利用系数	0.48
电压控制环 PI 控制 K_p	30
电压控制环 PI 控制 K_i	150

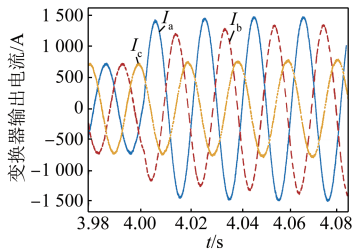
Park 控制策略的双馈风机模型如图 5 所示,设置仿真时长为 8 s,仿真步长为 1×10^{-6} s,在 4 s 时 A 相电压跌落 50%。通过对比传统 VSG 和 DDSRF-VSG-Spark 下的双馈风机在面对电网电压单相跌落情况下输出的电流、有功功率、无功功率和 dq 轴的电流来验证改进策略的有效性。

逆变器输出电流如图 6 所示,系统处于稳态时电流为 727 A;当电压发生跌落时,传统虚拟同步控制中 a 相、b 相、c 相电流的幅值为 1 489 A、1 440 A、793 A,电流的不平衡度为 0.2,最大冲击电流达到了稳态电流的 2.05 倍;经过 1 s 以后输出电流基本稳定,此时 a 相、b 相、c 相电流的幅值为 1 343 A、1 343 A、682 A,电流的不平衡度为 0.196,最大冲击电流达到了稳态时变换器输出电流的 1.85 倍。

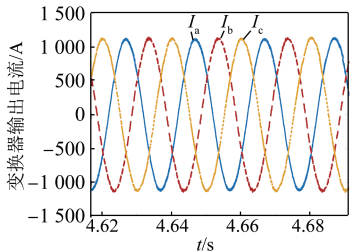
改进后的虚拟同步控制中,故障发生时 a 相、



(a) 电网电压单相跌落 50%



(b) 传统虚拟同步控制策略输出电流



(c) 本文虚拟同步控制策略输出电流

图 6 逆变器输出电流波形图

b 相、c 相电流的幅值为 1 119 A、1 131 A、1 137 A,电流的不平衡度为 0.003 7,最大冲击电流达到了稳态电流的 1.56 倍;经过 1 s 后系统 a

相、b 相、c 相电流的幅值为 1 050 A、1 072 A、1 046 A, 电流的不平衡度为 0.008 7, 最大冲击电流为稳态电流的 1.47 倍, 相较于传统 VSG 策略, 冲击电流分别下降了 0.49 p.u. 和 0.38 p.u.。

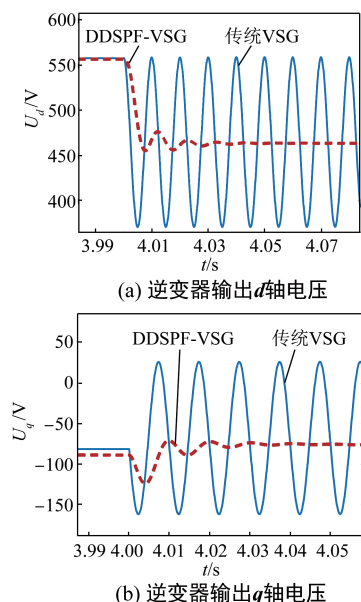


图7 逆变器输出的 d 轴和 q 轴电压

传统虚拟同步控制策略的双馈风机中采用了 dq 变换, 在电压单相跌落故障发生时存在电压正序分量和负序分量的耦合; 改进后的虚拟同步控制策略可以实现正序分量和负序分量的解耦, 仿真结果如图 7 所示。

DDSRF-VSG-Spark 下的双馈风机经过 0.04 s 后可以稳定输出直轴和交轴电压。传统虚拟同步控制中直轴电压的波幅达到了 185.6 V, 交轴电压波幅达到了 135.4 V。经过改进后的虚拟同步控制中直轴电压的波幅和交轴电压波幅分别为 19.9 V 和 50.6 V, 对比传统虚拟同步控制策略下直轴和交轴电压的波幅分别降低了 89.3% 和 62.6%, 为后续稳定的输出脉冲调制提供良好的基础。

图 8 为逆变器输出的有功功率和无功功率, 通过对比 4 s 之前的有功功率波形可知, 传统虚拟同步控制策略的双馈风机在电压跌落发生瞬间风机输出有功功率迅速增大至 0.73 p.u., 有功功率的突增会导致网侧逆变器寿命下降。改进后的虚拟同步控制策略在经过 1.5 s 后能够达到设定的功率输出, 有功功率经过短暂的超调以后达到

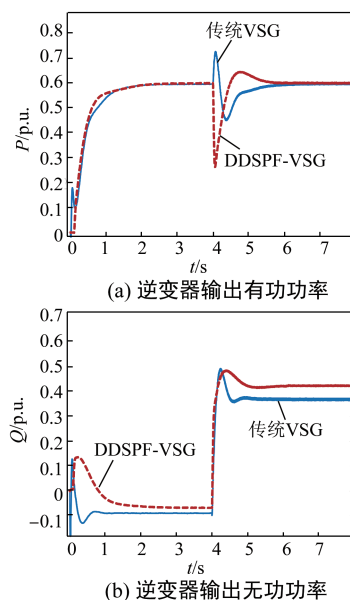


图8 逆变器输出有功和无功功率图

了额定的 0.6 p.u., 无功功率则达到了 0.42 p.u.。改进后的虚拟同步控制策略将超调量减少至 0.61 p.u., 并且可以提供较多的无功功率, 有利于系统电压恢复。

4 结 语

本文针对电网电压发生单相跌落, 虚拟同步控制下双馈风机输出电流和频率质量的问题, 提出 DDSRF-VSG-Spark 控制策略以实现正序分量与负序分量解耦、脉冲宽度调制信号的稳定输出, 进而达到输出平衡电流的目的。仿真结果表明, 该策略使得电压单相跌落故障发生时冲击电流幅值下降了 0.49 p.u., 输出电流不平衡度下降至 0.008 7; 同时直轴和交轴电压波动幅度分别降低了 89.3% 和 62.6%, 减少了暂态过渡时间, 提高了系统的稳定性。

【参考文献】

- [1] 王璨, 余玉龙. 电网电压骤降故障时双馈风机虚拟阻抗改进控制技术[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(9): 91-96.
- [2] 国家能源局. 国家能源局 2023 年一季度新闻发布会文字实录[EB/OL]. [2023-02-13]. http://www.nea.gov.cn/2023-02/13/c_1310697149.htm.
- [3] HU J B, XU H L, HE Y K. Coordinated control of DFIG's RSC and GSC under generalized unbalanced

- and distorted grid voltage conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 60(7): 2808-2819.
- [4] MARTINEZ M I, TAPIA G, SUSPERREGUI A, et al. DFIG power generation capability and feasibility regions under unbalanced grid voltage conditions [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1051-1062.
- [5] ZHOU P, HE Y K, SUN D. Improved Direct Power Control of a DFIG-Based Wind Turbine During Network Unbalance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(11): 2465-2474.
- [6] 任惠,熊吉,DAVID W,等. 基于历史故障记录数据的电网连锁故障规模概率分布研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(7):23-30.
- [7] 杨明,高龙将,王海星,等. 电网不平衡下虚拟同步发电机功率-电流协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(6):17-23.
- [8] 程雪坤,孙旭东,柴建云,等. 适用于电网不对称故障的双馈风力发电机虚拟同步控制策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(9):120-126.
- [9] 国家标准化管理委员会. GB/T 24337-2009,电能质量 公用电网间谐波 [2009-09-30]. <http://openstd.samr.gov.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=4FDA21610CB066028B7469FC405C72D6>.
- [10] 中国电力企业联合会. GB/T 19963.1-2021,风电场接入电力系统技术规定 第1部分:陆上风电[S]. 北京:中国电力企业联合会,2021.
- [11] 胡胜. 双馈型风力发电机在电网故障和不平衡条件下控制技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
- [12] DONG H N, YUAN S, HAN Z J, et al. A comprehensive strategy for accurate reactive power distribution, stability improvement, and harmonic suppression of multi-inverter-based micro-grid [J]. Energies, 2018, 11(4):745-760.
- [13] 赵新,金新民,周飞,等. 基于比例积分-降阶谐振调节器的并网逆变器不平衡控制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(19):84-92.
- [14] 党克,田勇. 不平衡电压下利用降阶谐振控制器的新型 VSG 控制策略[J]. 电机与控制应用,2020,47(8):63-67+86.
- [15] 康祯龙,郑婷婷,苗世洪,等. 不平衡电网电压下双馈感应发电机系统串联和并联网侧变换器协调控制策略[J]. 电工技术学报,2018,33(A01):193-204.
- [16] SHI K, SONG W, XU P, et al. Low-Voltage Ride-Through Control Strategy for a Virtual Synchronous Generator Based on Smooth Switching [J]. IEEE Access, 2018, 6: 2703-2711.
- [17] RODRIGUEZ P, POU J, BERGAS J, et al. Decoupled doublesynchronous reference frame PLL for power converters control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 584-592.
- [18] 董雁楠. 含虚拟同步技术的微电网运行优化控制策略研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2020.
- [19] 孙军,蒋天龙,王仰铭,等. 不平衡电网下双馈感应发电机的虚拟同步机控制优化策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(10):135-144.
- [20] 王健,张建华,辛付龙. 双馈电机电压跌落暂态过程分析[J]. 大电机技术,2012(3):13-16+20.
- [21] 戴春蕾,张建华,郭建,等. 双馈感应发电机单相电压跌落故障低电压穿越研究[J]. 微电机,2016,49(9):6-10.
- [22] 文武松,张颖超,王璐,等. 解耦双同步坐标系下单相锁相环技术[J]. 电力系统自动化,2016,40(20):114-120.
- [23] 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,2016.