

# 电网电压跌落下无刷双馈发电机低电压穿越控制<sup>\*</sup>

杨小亮<sup>1,2</sup>, 白家俊<sup>1</sup>, 金楠<sup>1,2</sup>, 崔瑜月<sup>1</sup>, 王锐<sup>1</sup>, 袁遇龙<sup>1</sup>

(1. 郑州轻工业大学 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002;

2. 河南省信息化电器重点实验室, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 电网电压跌落的瞬间, 风力发电机定子和转子产生冲击电压和冲击电流, 对电网安全造成影响。为实现无刷双馈风力发电机低电压穿越, 保证风电机组在电网电压跌落下不间断运行, 对电网电压跌落下无刷双馈发电机定子电压和电流进行暂态分析, 搭建了无刷双馈发电机在功率绕组静止坐标系下的数学模型, 推导并分析了电网电压跌落瞬间其功率绕组磁链、控制绕组电压动态变化过程, 并提出一种积分滑模直接功率控制与故障穿越控制相结合的控制策略, 完成无刷双馈发电机低电压穿越控制。通过 MATLAB/Simulink 和半实物仿真试验平台进行验证, 仿真和试验结果证明所推导功率绕组磁链和控制绕组电压动态变化过程的正确性及控制策略的有效性, 该控制策略有效抑制了定子控制绕组侧电压和电流畸变, 提高了无刷双馈发电机的低电压穿越性能。

**关键词:** 无刷双馈电机; 电网电压跌落; 低电压穿越; 暂态过程分析; 直接功率控制

**中图分类号:** TM315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2023)08-0073-11

**doi:** 10.12177/emca.2023.091

## Low Voltage Ride-Through Control of Brushless Doubly-Fed Generators Under Grid Voltage Drop<sup>\*</sup>

YANG Xiaoliang<sup>1,2</sup>, BAI Jiajun<sup>1</sup>, JIN Nan<sup>1,2</sup>, CUI Yuyue<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>1</sup>, YUAN Yulong<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry,

Zhengzhou 450002, China;

2. Henan Key Lab of Information Based Electrical Appliances, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** When the grid voltage drops, the stator and rotor of the wind turbine generate impulse voltage and impulse current, which will affect the security of the grid. In order to realize the low voltage ride-through of the brushless doubly-fed wind turbine and ensure the uninterrupted operation of the wind turbine under the grid voltage drop, transient analysis of the stator voltage and current of the brushless doubly-fed generator under the grid voltage drop is conducted. A mathematical model of brushless doubly-fed generator in the static coordinate system of power winding is built, then the dynamic change process of its power winding flux linkage and control winding voltage at the moment of grid voltage drop is deduced and analyzed, moreover a control strategy combining integral sliding mode direct power control and fault ride through control is proposed, hence the low-voltage ride through control of brushless doubly-fed generator is completed. The control strategy combined with the fault ride-through control completes the low voltage ride-through control of the brushless doubly-fed generator. Through MATLAB/Simulink and the semi-physical simulation experiment platform, the simulation and experimental results prove the correctness of the deduced power winding flux and control winding voltage dynamic change process and the effectiveness of the control strategy. The control strategy effectively inhibits the voltage and current distortion of the stator control winding side and improves the

收稿日期: 2023-02-15; 收到修改稿日期: 2023-04-25

<sup>\*</sup> 基金项目: 河南省重点研发与推广专项(212102210024, 222102220064); 河南省高等学校重点科研项目计划(22IRTSTHN017)

作者简介: 杨小亮(1980—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为风力发电、电机控制。

low voltage crossing performance of the brushless doubly-fed generator.

**Key words:** brushless doubly-fed generator (BDFG); grid voltage drop; low voltage ride-through (LVRT); transient process analysis; direct power control (DPC)

## 0 引言

随着工业规模的不断扩大,化石能源的过度开采,生态环境遭受破坏,因此世界各国提倡发展新能源。风能作为一种清洁可再生能源,其资源极其丰富,风力发电是解决能源与环境问题最好的发电模式之一<sup>[1-3]</sup>。无刷双馈发电机(BDFG)是一种新型交流感应电机,因其无电刷与滑环且使用寿命长、可靠性高、维护成本低,使得BDFG在风力发电领域具有广阔的应用前景<sup>[4-5]</sup>。由于BDFG的多变量、强耦合和复杂非线性系统结构的限制,其较难实现风力发电系统的高性能控制<sup>[6]</sup>。张凤阁等<sup>[7]</sup>提出无刷双馈磁阻式发电机(BDFRG)统一等效电路,实现无刷双馈发电机结构的简化及其高性能控制。

随着风力发电系统的快速发展,电网中的风机容量所占比例增大。电网对风电机组的发电技术和维持稳定运行能力的要求也越来越高,保证风力发电机组在电网电压跌落期间不脱网运行,是对其在电网电压跌落故障穿越能力的严格考验<sup>[8-9]</sup>。

针对电网故障下风力发电机的运行状态及控制策略,学者们提出了不同的想法。文献[10]分析了双馈型风力发电机(DFIG)在电网故障下的动态过程,在电网故障和恢复时刻DFIG的直流定子磁链增大导致转子回路产生较大的电动势,为此提出了一种不受系统参数变化影响的改进退磁控制方法,缩短动态过程,提高电网故障恢复时刻的DFIG低电压穿越能力。文献[11]提出了一种基于暂态补偿的电压源DFIG组低压穿越控制策略。通过分析电机定子磁链的暂态模型,及时将暂态补偿注入转子侧,并通过矢量分析优化补偿相位角,使故障时刻的转子电流冲击最小,提高了DFIG在电网故障下的稳定运行能力。文献[12]提出一种DFIG的虚拟电感抑制控制绕组过电流的低电压穿越(LVRT)控制策略。通过对虚拟电感值的计算和理论分析,对虚拟电感进行改进,最终消除电网故障引起的控制绕组过电流。文献[13]为消除电网电压故障对BDFG的影响,

在网侧变流器采用双电流内环控制,消除直流电压波动。在控制绕组回路采用主辅控制器,抑制功率绕组、控制绕组电流畸变和功率波动,实现相应的控制策略。文献[14]在BDFG运行系统中提出正向坐标系下的PIR控制。在正向同步旋转坐标系下,定转子正负序电流可通过坐标变换得到直流量和二倍频交流量,针对得到的交直流分量可通过PIR控制器实现无静差跟踪。相较于双电流内环控制,该方法无需电流正负序的分离,简化了控制系统。

本文在电网电压跌落下,对BDFRG的定、转子的电压和电流进行暂态分析。通过推导BDFRG的数学模型,分析其在电网电压跌落下,功率绕组磁链、控制绕组电压动态变化过程,并在此基础上采用本文提出的一种积分滑模与低电压穿越相结合的控制策略,完成无刷双馈发电机在电网电压跌落期间的低电压穿越,最后通过MATLAB/Simulink和半实物仿真试验平台对所提出的控制方法进行验证。结果表明,在电网电压跌落下,引起无刷双馈发电机定子控制绕组电压过大的原因为定子功率绕组磁链的突变,通过本文所提低电压控制策略,BDFRG风力发电系统输出的无功功率在电网电压跌落期间增加,为风力发电系统低电压穿越提供无功功率,并维持电网电压稳定,完成低电压穿越,有效降低电网电压跌落对BDFRG风力发电系统的影响。

## 1 无刷双馈发电机的数学模型

### 1.1 BDFRG 变速恒频发电机理

BDFRG的定子包含两套不同极对数的独立绕组,即功率绕组(PW)和控制绕组(CW),其中PW直接连接电网,CW经变频器接至电网<sup>[15]</sup>,BDFRG风力发电系统结构框图如图1所示。

通过转子对定子两套绕组中电流产生的磁场进行调制,实现机电能量的转换。BDFRG在双馈运行时,转子上只有一种电流,故两定子磁场在转子中感应的电流频率相同。则BDFRG在双馈运行状态时转子转速 $\omega_r$ 与定子频率之间的关系为<sup>[16]</sup>

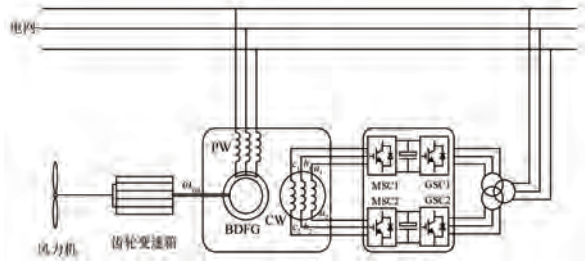


图1 无刷双馈发电机变速恒频风力发电系统

$$\omega_r = \frac{\omega_1 \pm \omega_2}{p_1 + p_2} \quad (1)$$

式中:  $p_1$ 、 $p_2$  分别为 PW 和 CW 的极对数,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  分别为 PW 和 CW 频率。

当 CW 侧通入直流电, BDFRG 运行在同步运行状态, 转速为

$$\omega_r = \frac{\omega_1}{p_1 + p_2} \quad (2)$$

双馈运行模式期间, 当转速  $\omega_r$  变化时, 适当调节 CW 侧的线路角频率  $\omega_2$ , 可使 PW 输出侧的线路频率  $\omega_1$  维持不变, 从而实现 BDFRG 变速恒频发电。同步运行期间, 转子转速称为自然转速, 其大小与电网频率、定子极对数相关。

## 1.2 BDFRG 数学模型

BDFRG 在 PW 静止坐标系下的数学模型为

$$u_1 = R_1 i_1 + p \psi_1 \quad (3)$$

$$u_2 = R_2 i_2 + p \psi_2 - j \omega_r \psi_2 \quad (4)$$

$$\psi_1 = L_1 i_1 + L_{12} i_2 \quad (5)$$

$$\psi_2 = L_2 i_2 + L_{12} i_1 \quad (6)$$

式中:  $u$ 、 $i$  和  $\psi$  分别为电压、电流和磁链的矢量;  $R$ 、 $L$  分别为电阻和电感; 下标 1 和 2 分别代表 PW 和 CW 绕组;  $p$  为微分算子。

BDFRG 的等效电路图如图 2 所示。

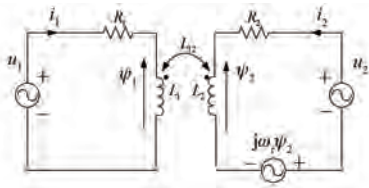


图2 BDFRG 等效电路图

在 BDFRG 正常运行系统中, PW 直接与电网相接。在风力发电系统稳定运行状态下, PW 电压矢量旋转速度与电网频率保持一致, 故电压矢量可表示为

$$u_1 = |u_1| e^{j\omega_1 t} \quad (7)$$

根据式(5)可推导得 PW 电流表达式:

$$i_1 = \frac{\psi_1 - L_{12} i_2}{L_1} \quad (8)$$

将式(8)代入式(6)中可得:

$$\psi_2 = L_2 i_2 + \frac{L_{12}}{L_1} \psi_1 - \frac{L_{12}^2}{L_1} i_2 = \frac{L_1 L_2 - L_{12}^2}{L_1} i_2 + \frac{L_{12}}{L_1} \psi_1 \quad (9)$$

再将式(9)代入式(4)中, 则 CW 电压可推导为

$$u_2 = R_2 i_2 + \frac{L_{12}}{L_1} (p + j\omega_r) \psi_1 +$$

$$\frac{L_1 L_2 - L_{12}^2}{L_1} (p + j\omega_r) i_2 = u_{R_2} + u_{\psi_1} + u_{L_l} \quad (10)$$

式中:  $u_{\psi_1}$  为 PW 侧磁链  $\psi_1$  变化产生的感应反电动势;  $u_{R_2}$  为 CW 侧回路电阻压降;  $u_{L_l}$  为 CW 的回路等效电感压降。

其中:

$$u_{R_2} = R_2 i_2 \quad (11)$$

$$u_{\psi_1} = \frac{L_{12}}{L_1} (p + j\omega_r) \psi_1 \quad (12)$$

$$u_{L_l} = \frac{L_1 L_2 - L_{12}^2}{L_1} (p + j\omega_r) i_2 \quad (13)$$

$$L_l = \frac{L_1 L_2 - L_{12}^2}{L_1} \quad (14)$$

由式(10)可知, CW 侧电压可分为三部分, 即  $u_{\psi_1}$ 、 $u_{R_2}$  和  $u_{L_l}$ 。CW 电压等效电路图如图 3 所示。

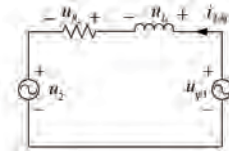


图3 BDFRG CW 回路等效电路图

根据式(3)可知 BDFRG 的 PW 侧电阻压降与其磁链变换产生的感应电动势相比较小, 可将其忽略, 则 PW 电压表达式可简化为

$$u_1 = \frac{d\psi_1}{dt} = j\omega_1 \psi_1 \quad (15)$$

将式(15)代入式(10)中可得:

$$u_{\psi_1} = \frac{L_{12}}{L_1} \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} |u_1| e^{j\omega_1 t} \quad (16)$$

在 BDFRG 风力发电系统运行期间, CW 回路中的阻抗压降与其磁链变化产生的感应电动势相比可忽略不计。故可将 CW 侧电压等效为

$$u_2 \approx u_{\psi_1} = \frac{L_{12}}{L_1} \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} |u_1| e^{j\omega_1 t} \quad (17)$$

根据式(1)将 PW 静止坐标系下的 CW 电压转换到 CW 静止坐标系中,其表达式为

$$u_2^{(cw)} \approx u_{\psi_1}^{(cw)} = \frac{L_{12}}{L_1} \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} |u_1| e^{j[\omega_1 - (p_1 + p_2)\omega_r]t} \quad (18)$$

由式(18)可知,电网频率  $\omega_1$  恒定, PW 电压幅值  $u_1$  恒定且与电网电压保持一致,则 CW 静止坐标系下的 CW 电压幅值大小与转子角速度相关。

## 2 电网电压故障下的 BDFRG

### 2.1 电网电压跌落下 BDFRG 的暂态分析

在研究电网电压跌落期间 CW 电压的动态变化过程中,为简化 BDFRG 强耦合、非线性结构,令 CW 电流回路断路,即  $i_2 = 0$ 。在  $t_0$  时刻电网电压发生跌落,其故障前后的 PW 电压表达式如下所示:

$$u_1 = \begin{cases} |u_1| e^{j\omega_1 t} & (t < t_0) \\ (1 - \alpha) |u_1| e^{j\omega_1 t} & (t \geq t_0) \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $\alpha$  代表电网电压跌落程度,当  $\alpha = 1$  代表电网电压完全跌落。

将式(8)、式(18)代入式(3)中,并令  $i_2 = 0$ ,根据换路定则原理,在电网电压跌落时刻 PW 磁链  $\psi_1$  的变化如下:

$$\psi_1 = \begin{cases} \frac{|u_1| e^{j\omega_1 t}}{j\omega_1} & (t < t_0) \\ \frac{(1 - \alpha) |u_1| e^{j\omega_1 t}}{j\omega_1} + \frac{\alpha |u_1| e^{j\omega_1 t_0} e^{-(t-t_0)/\tau}}{j\omega_1} & (t \geq t_0) \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $\tau = L_1/R_1$  为时间常数。

在电网电压发生故障后, PW 磁链由两部分组成,第一部分幅值为  $(1 - \alpha) |u_1|/\omega_1$  且保持恒定,并以电网频率  $\omega_1$  旋转变换;第二部分幅值为  $\alpha |u_1| e^{-(t-t_0)/\tau}/\omega_1$ ,其幅值以时间常数  $\tau$  呈指数衰

减。

将式(20)代入式(17)中推导 BDFRG 的 CW 等效电压表达式为

$$u_2 = \frac{L_{12}}{L_1} \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} |u_1| e^{j\omega_1 t} + \frac{L_{12}}{L_1} \frac{\omega_r}{\omega_1} |u_1| e^{j\omega_1 t_0} e^{-(t-t_0)/\tau} e^{-j\omega_r t} = \frac{L_{12}}{L_1} \frac{\omega_r}{\omega_1} \alpha |u_1| e^{j\omega_1 t_0} e^{-(t-t_0)/\tau} + \frac{L_{12}}{L_1} \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} (1 - \alpha) |u_1| e^{j\omega_1 t} \quad (21)$$

将式(21)转换到 CW 静止坐标系当中得:

$$u_2^{(cw)} = \frac{L_{12}}{L_1} \frac{\omega_r}{\omega_1} \alpha |u_1| e^{j\omega_1 t_0} e^{-(t-t_0)/\tau} e^{-j(p_1 + p_2)\omega_r t} + \frac{L_{12}}{L_1} \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} (1 - \alpha) |u_1| e^{j[\omega_1 - (p_1 + p_2)\omega_r]t} \quad (22)$$

通过上述可列出 BDFRG 的 CW 电压在电网电压故障前后的表达式:

$$u_{2(t < t_0)}^{(cw)} = \frac{L_{12}}{L_1} \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} |u_1| e^{j[\omega_1 - (p_1 + p_2)\omega_r]t} \quad (23)$$

$$u_{2(t \geq t_0)}^{(cw)} = \frac{L_{12}}{L_1} \frac{\omega_r}{\omega_1} \alpha |u_1| e^{j\omega_1 t_0} e^{-(t-t_0)/\tau} e^{-j(p_1 + p_2)\omega_r t} + \frac{L_{12}}{L_1} \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} (1 - \alpha) |u_1| e^{j[\omega_1 - (p_1 + p_2)\omega_r]t} \quad (24)$$

由式(23)可知,电网电压发生故障前 CW 的等效电压幅值恒定,且以频率  $\omega_1 - (p_1 + p_2)\omega_r$  在 CW 回路运行,其幅值最大为

$$|u_2^{(cw)}|_{(t < t_0)\max} = \frac{L_{12}}{L_1} \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} |u_1| \quad (25)$$

电网电压发生故障后, CW 电压由两部分组成,分别为电网电压跌落引起的 PW 等效电压直流量和 PW 电压分量。其幅值大小与电网故障发生的时刻有关,故在确定电网故障后的 CW 等效电压幅值最大点时,还需根据电网电压故障发生时刻  $t_0$  或  $t_0 + \pi/\omega_1$  对 CW 等效电压进行计算比较。

### 2.2 电网电压跌落下无刷双馈发电机低电压穿越

由电网电压跌落下无刷双馈发电机的运行特性分析可知, PW 磁链的变化是 CW 电压幅值急剧变化的原因。在此基础上,采用积分滑模直接功率控制模式与故障穿越模式相结合的控制策略,完成无刷双馈发电机的故障穿越。

在电网电压正常运行期间,采用积分滑模直接功率控制模式,对同步旋转坐标系中的  $d$  轴进行定子磁链定向,此时  $d$ 、 $q$  轴上的磁链分量和电压分量分别为  $\psi_{pd}=\psi_p$ 、 $\psi_{pq}=0$ 、 $U_{pq}=U_p$ 、 $U_{pd}=0$ ,由 BDFRG 在 PW 静止坐标系下的数学模型推导出同步旋转坐标系下, PW 电流和 CW 磁链的关系为

$$\begin{cases} i_{qp} = \frac{L_{pc}}{L_p L_c - L_{pc}^2} \psi_{qc} \\ i_{dp} = -\frac{L_{pc}}{L_p L_c - L_{pc}^2} \psi_{dc} + \frac{L_c}{L_p L_c - L_{pc}^2} \psi_p \end{cases} \quad (26)$$

有功功率、无功功率表达式为

$$\begin{cases} P = \frac{3U_p L_{pc}}{2(L_p L_c - L_{pc}^2)} \psi_{qc} \\ Q = \frac{3}{2} U_p \left( -\frac{L_{pc}}{L_p L_c - L_{pc}^2} \psi_{dc} + \frac{L_c}{L_p L_c - L_{pc}^2} \psi_p \right) \end{cases} \quad (27)$$

有功功率和无功功率对时间  $t$  的导数为

$$\begin{cases} \frac{dP(t)}{dt} = \frac{3u_p L_{pc}}{2(L_p L_c - L_{pc}^2)} U_{qc} + (\omega_r - \omega) Q(t) - \\ (\omega_r - \omega) \frac{3U_p L_c}{2(L_p L_c - L_{pc}^2)} \psi_p \\ \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{3u_p L_{pc}}{2(L_p L_c - L_{pc}^2)} U_{dc} - (\omega_r - \omega) P(t) \end{cases} \quad (28)$$

对式(28)整理得:

$$\begin{cases} \dot{P} = AU_{cq} + A(\omega_r - \omega) \psi_{cd} \\ \dot{Q} = -AU_{cd} - A(\omega_r - \omega) \psi_{cq} + B\omega \psi_{pq} \\ A = \frac{3U_p L_{pc}}{2(L_p L_c - L_{pc}^2)} \\ B = \frac{3U_p L_c}{2(L_p L_c - L_{pc}^2)} \end{cases} \quad (29)$$

设滑模变结构的系统状态变量与参考量之差为

$$\begin{cases} X_P = P - P_{ref} \\ X_Q = Q - Q_{ref} \end{cases} \quad (30)$$

系统的滑动面方程为滑模控制器的状态变量以及其积分项之和:

$$\begin{cases} S_P = X_P + c_i \int_{-\infty}^t X_P(s) ds = 0 \\ S_Q = X_Q + c_i \int_{-\infty}^t X_Q(s) ds = 0 \end{cases} \quad (31)$$

积分器初始状态:

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^0 X_P(s) ds = -\frac{X_P}{c_i} \\ \int_{-\infty}^0 X_Q(s) ds = -\frac{X_Q}{c_i} \end{cases} \quad (32)$$

故  $t=0$  时刻有  $SP=SQ=0$ ,则由式(30)可得:

$$\begin{cases} \dot{X}_P = \frac{dP}{dt} - \frac{dP_{ref}}{dt} = AU_{cq} + A(\omega_r - \omega) \psi_{cd} \\ \dot{X}_Q = \frac{dQ}{dt} - \frac{dQ_{ref}}{dt} = -AU_{cd} - A(\omega_r - \omega) \psi_{cq} + \\ B\omega \psi_{pq} \end{cases} \quad (33)$$

式中:  $X_P$  和  $X_Q$  分别为无刷双馈发电机有功功率、无功功率实际值与其给定值之差;  $P_{ref}$  和  $Q_{ref}$  均为常量,故  $dP_{ref}/dt = dQ_{ref}/dt = 0$ ;  $S_P$  为系统有功功率给定值和实际值的差值与积分项之和,  $S_Q$  为无功功率给定值和实际值的差值与积分项之和;  $c_i$  是滑动面系数,  $P_{ref}$ 、 $Q_{ref}$  分别有功功率和无功功率的给定值。

根据式(33)求其等效控制:

$$\begin{cases} U_{cd}^{eq} = (\omega - \omega_r) \psi_{cd} \\ U_{cq}^{eq} = (\omega - \omega_r) \psi_{cq} + \frac{B}{A} \omega \psi_{pq} \end{cases} \quad (34)$$

考虑参数误差以及外部扰动时,求出其开关等效控制,此时:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{P\Delta} &= \dot{X}_P + c_i X_P = A(U_{cq}^{eq} + \Delta U_{cq} + H_q) + \\ &A(\omega_r - \omega) \psi_{cd} + c_i X_P = 0 \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \dot{S}_{Q\Delta} &= \dot{X}_Q + c_i X_Q = -A(U_{cd}^{eq} + \Delta U_{cd} + H_d) - \\ &A(\omega_r - \omega) \psi_{cq} + B\omega \psi_{pq} + c_i X_Q = 0 \end{aligned} \quad (36)$$

将式(34)代入式(35)和式(36)中可得:

$$\begin{cases} \dot{S}_{P\Delta} = -B\Delta U_{cq} - BH_q \\ \dot{S}_{Q\Delta} = -B\Delta U_{cd} - BH_d \end{cases} \quad (37)$$

为保证  $dV/dt < 0$ ,设计新型趋近率的滑模控制律为

$$\begin{cases} \Delta U_q = K_q |p| \text{sat}(S_p) |S_p|^a + \eta S_p \\ \Delta U_d = K_d |p| \text{sat}(S_Q) |S_Q|^a + \eta S_Q \\ \rho = \int_0^t (K\rho + s) dt, K < 0 \end{cases} \quad (38)$$

在新型趋近率中用积分项  $\rho$  项代替  $X$ , 在系统滑动模态阶段当  $S$  趋近于零时,  $S$  的积分也趋近于零,  $\rho$  值也趋近于零, 并最终消除  $\text{sat}(s)$  项; 积分项中引入负的加权值  $K$ , 可使其切换增益大大降低, 有效避免指数趋近率趋近阶段切换增益大, 抖振严重的现象。

故 CW 反馈电压为

$$\begin{cases} U_{cd} = U_{cd}^{eq} + \Delta U_{cd} \\ U_{cq} = U_{cq}^{eq} + \Delta U_{cq} \end{cases} \quad (39)$$

令 CW 等效电压满足 Lyapunov 渐进稳定条件, 实现有功功率和无功功率的直接控制。

在电网电压跌落期间, 采用故障穿越模式。通过检测电网电压幅值, 当电网电压幅值发生变化时, 系统自动切换控制模式, 由正常工作运行下的积分滑模直接功率控制模式切换为低电压穿越模式。在低电压穿越模式中, 本文将从功率出发, 分析功率与 CW 电压之间的关系, 通过给定功率推导相应的 CW 电压指令值, 将得到的 CW 电压指令值反馈到无刷双馈发电机风力发电系统中, 最后通过 PI 调节器实现无刷双馈发电机低电压穿越过程。

无刷双馈发电机在两相旋转  $dq$  坐标系下电压方程、磁链方程的数学模型为<sup>[17]</sup>

$$\begin{cases} U_{pq} = R_p i_{pq} + s\psi_{pq} + \omega_s \psi_{pd} \\ U_{pd} = R_p i_{pd} + s\psi_{pd} - \omega_s \psi_{pq} \\ U_{cq} = R_c i_{cq} + s\psi_{cq} + (\omega_r - \omega_s) \psi_{cd} \\ U_{cd} = R_c i_{cd} + s\psi_{cd} - (\omega_r - \omega_s) \psi_{cq} \end{cases} \quad (40)$$

$$\begin{cases} \psi_{pq} = L_p i_{pq} - L_{pc} i_{cq} \\ \psi_{pd} = L_p i_{pd} + L_{pc} i_{cd} \\ \psi_{cq} = -L_{pc} i_{pq} + L_c i_{cq} \\ \psi_{cd} = L_{pc} i_{pd} + L_c i_{cd} \end{cases} \quad (41)$$

在两相旋转  $dq$  坐标系内, 将定子磁链定向到  $d$  轴, 此时  $d$ 、 $q$  轴上的磁链分量和电压分量分别为  $\psi_{pd} = \psi_p$ 、 $\psi_{pd} = 0$ 、 $U_{pq} = U_p$ 、 $U_{pq} = 0$ , 根据式 (19) 可推导 PW 电流与 CW 电流之间的关系如下:

$$\begin{cases} i_{pq} = K_1 i_{cq} \\ i_{pd} = -K_1 i_{cd} + D_{pd} \end{cases} \quad (42)$$

其中  $K_1 = L_{pc}/L_p$ 、 $D_{pd} = \psi_p/L_p$ 。

再将式 (41) 中的 CW 磁链表达式代入式 (40) 中的 CW 电压方程中得:

$$\begin{cases} U_{cd} = (R_c + L_c s) i_{cd} + L_{pc} s i_{pd} + (\omega_r - \omega_s) (L_{pc} i_{pq} - L_c i_{cq}) \\ U_{cq} = (R_c + L_c s) i_{cq} - L_{pc} s i_{pq} + (\omega_r - \omega_s) (L_{pc} i_{pd} - L_c i_{cd}) \end{cases} \quad (43)$$

将式 (42) 代入到式 (43) 中可得:

$$\begin{cases} U_{cd} = (R_c + L_c s) i_{cd} + L_{pc} s i_{pd} + \frac{(\omega_r - \omega_s) (L_{pc}^2 - L_p L_c)}{L_{pc}} i_{pq} \\ U_{cq} = (R_c + L_c s) i_{cq} - L_{pc} s i_{pq} + \frac{(\omega_r - \omega_s) (L_{pc}^2 - L_p L_c)}{L_{pc}} i_{cq} + \frac{(\omega_r - \omega_s) L_c}{L_{pc}} \psi_p \end{cases} \quad (44)$$

将式 (22) 变换可得:

$$\begin{cases} i_{cd} = K_c U_{cd} + D_d \\ i_{cq} = K_c U_{cq} + D_q \end{cases} \quad (45)$$

其中:

$$\begin{cases} K_c = \frac{1}{R_c + L_c s} \\ D_d = -\frac{L_{pc} s i_{pd}}{R_c + L_c s} - \frac{(\omega_r - \omega_s) (L_{pc}^2 - L_p L_c) i_{pq}}{L_{pc} (R_c + L_c s)} \\ D_q = \frac{L_{pc} s i_{pq}}{R_c + L_c s} - \frac{(\omega_r - \omega_s) (L_{pc}^2 - L_p L_c) i_{pd}}{L_{pc} (R_c + L_c s)} - \frac{(\omega_r - \omega_s) L_c \psi_p}{(R_c + L_c s) L_{pc}} \end{cases} \quad (46)$$

BDFRG 的低电压穿越控制框图如图 4 所示。通过上述推导过程分析, 在低电压故障穿越模式期间, 有功功率、无功功率给定值均可输出相对应的 CW 电压指令值, 将其反馈至 BDFRG 中, 可完成低电压穿越。

### 3 仿真分析

为了验证 BDFRG 在电网电压跌落下的低电压穿越, 本文基于 MATLAB/Simulink 搭建 BDFRG 数学模型仿真, 模拟电网电压跌落下 PW 电压与 CW 等效电压。另外, 分别对 BDFRG 施加直接功率控制与低电压穿越控制策略, 并对 BDFRG 进行仿真分析。

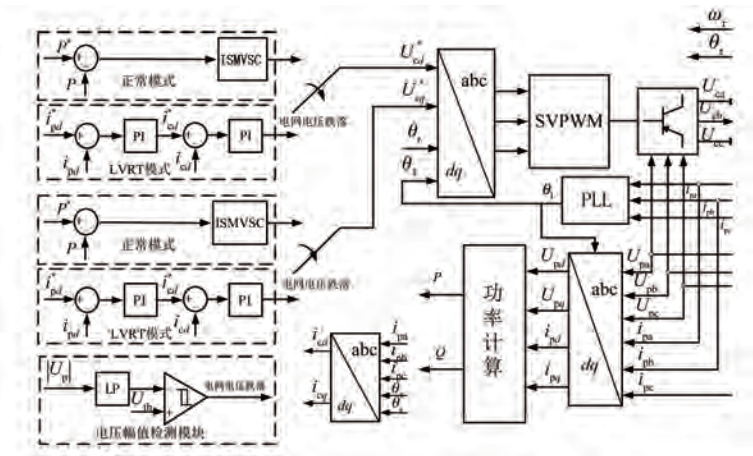


图4 BDFRG 低电压穿越控制框图

电网电压在 1.5 s 发生跌落 ( $\alpha=0.5$ ), 因 PW 电压与电网电压直接相连, 其电压电流波形如图 5 所示。因电机固有属性<sup>[18]</sup>, PW 电流在电网电压跌落期间并非瞬间变化, 而是动态下降变化过程, 其电流幅值经振荡后趋于稳定。

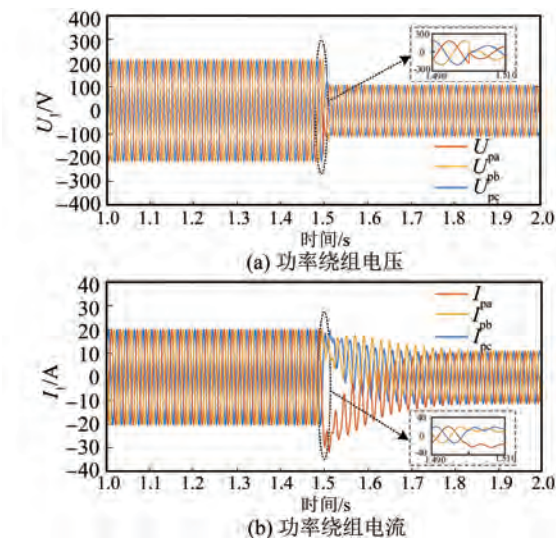


图5 电网电压跌落下 PW 的电压及电流

由式(23)和式(24)可知, 在电网电压故障前后 CW 电压幅值将发生变化, 幅值的大小均与 BDFRG 的转子转速相关。在电网电压故障前后, 分别对 BDFRG 的亚同步运行模式与超同步运行模式下 CW 的电压进行数值计算和理论分析。

BDFRG 自然转速为 500 r/min, 令转子转速为 400 r/min, 使其工作在亚同步运行模式下, 在电网电压跌落前的稳定运行期间, 由式(23)可得

$$|u_2^{(cw)}|_{(t < t_0)_{\max}} = \frac{L_{12}}{L_1} \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} |u_1| = 0.191 |u_1| = 42.02 \text{ V},$$

CW 电压频率根据式(1)可得  $\omega_2 = 10 \times 2\pi = 20\pi \text{ rad/s}$ 。BDFRG 相关参数如表 1 所示。

表1 BDFRG 的相关参数

| 参数名称            | 参数值     |
|-----------------|---------|
| PW 极对数          | 4       |
| CW 极对数          | 2       |
| PW 电阻/ $\Omega$ | 0.387 2 |
| CW 电阻/ $\Omega$ | 0.387 3 |
| PW 自感/mH        | 40.25   |
| CW 自感/mH        | 48.79   |
| PW 与 CW 的互感/mH  | 38.48   |
| 额定功率/kW         | 23      |

电网电压跌落, 根据式(24)计算 CW 电压的最大幅值为 104.94 V, 此时 CW 角频率  $\omega_2 = 40 \times 2\pi = 80\pi \text{ rad/s}$ 。

令 BDFRG 转子转速为 600 r/min, 使其工作在超同步运行模式下, 在电网故障发生前, 根据式(25)可知  $|u_2^{(cw)}|_{(t < t_0)_{\max}} = 42.02 \text{ V}$ 。

相应地在电网故障发生后, 计算出 CW 电压最大幅值为 146.96 V。该模式下 CW 频率  $\omega_2 = 60 \times 2\pi = 120\pi \text{ rad/s}$ 。

通过上述分析可知, 在电网电压发生部分跌落 ( $\alpha=0.5$ ) 期间, CW 电压在电网故障发生前后其幅值瞬间变化。BDFRG 在亚同步运行模式和超同步运行模式下 CW 电压的变化过程如图 6 所示。

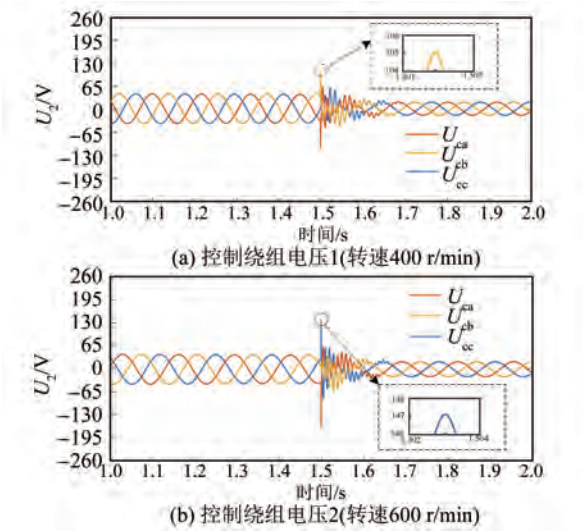


图6 电网电压跌落下的CW电压

由图6可知,电网电压跌落期间,CW电压的幅值发生较大变化。明显可以看出,电网故障下BDFRG工作在亚同步运行模式期间,其电压幅值由稳定运行的42.02 V变为104.94 V;在超同步运行期间CW电压幅值由42.02 V变为146.96 V。电网电压跌落前后,CW电压的仿真验证了上述理论的推导。

图7为积分滑模与传统滑模的直接功率控制比较。图7(a)、(b)分别为传统滑模控制作用下的有功功率和无功功率,图7(c)、(d)分别为积分滑模控制作用下的有功功率和无功功率。通过对比可知,与传统滑模直接功率控制相比,积分滑模直接功率控制能够更好地对功率直接控制,并有效抑制高频开关控制抖振现象,可实现对功率的

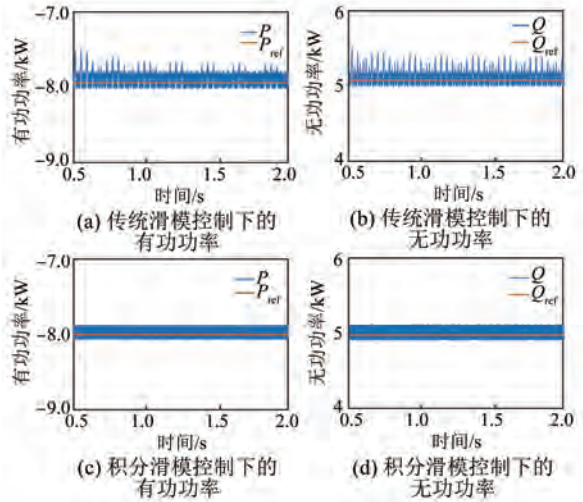


图7 积分滑模与传统滑模直接功率控制比较

精准控制。

在电网电压跌落程度为50%时,对BDFRG进行直接功率控制,其CW电流、有功功率、无功功率如图8所示。

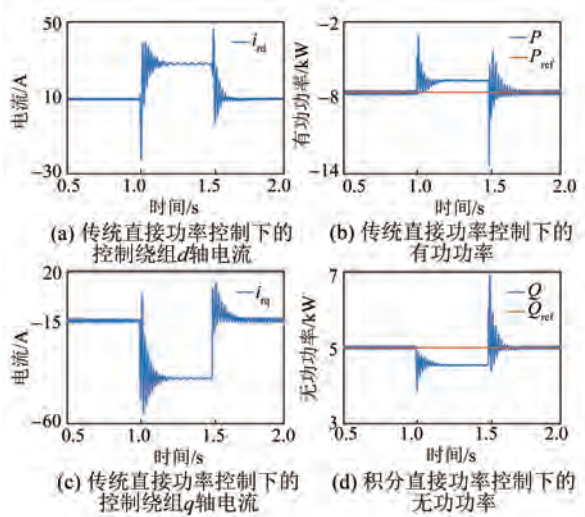


图8 传统功率控制策略下CW电流与功率

从图8(a)中可以看出,0.5~1.0 s时电网电压正常运行,CW电流波形保持恒定,且幅值稳定不变;1~1.5 s时电网电压跌落,CW电流在1.0 s开始动态变化,幅值发生改变,经过短暂地调整后CW电流的幅值趋于稳定,达到新的稳定工作状态;在1.5 s时电网电压恢复正常,CW电流幅值瞬间变化,在直接功率控制系统作用下,CW电流幅值不断调整,最后恢复至电网电压跌落前的正常运行状态。

图8(b)为电网电压跌落下BDFRG直接功率控制系统中的有功功率、无功功率波形,其中有功功率给定值为-8 kW,无功功率给定值为5 kvar。在0.5~1.0 s时电网电压正常运行,BDFRG直接功率控制系统输出有功功率、无功功率都能较好地跟踪其给定值;1.0~1.5 s期间电网电压跌落,系统输出的有功功率、无功功率均经过短暂的动态过程后趋于稳定,并且都无法跟踪功率给定值;1.5~2.0 s期间电网电压恢复正常运行,系统输出功率通过动态调整后跟踪其功率给定值。

为了验证电网电压跌落下BDFRG低电压穿越模式的有效性,令电网电压跌落程度为50%,在MATLAB/Simulink仿真平台搭建相应的模型并进行分析,如图9所示。

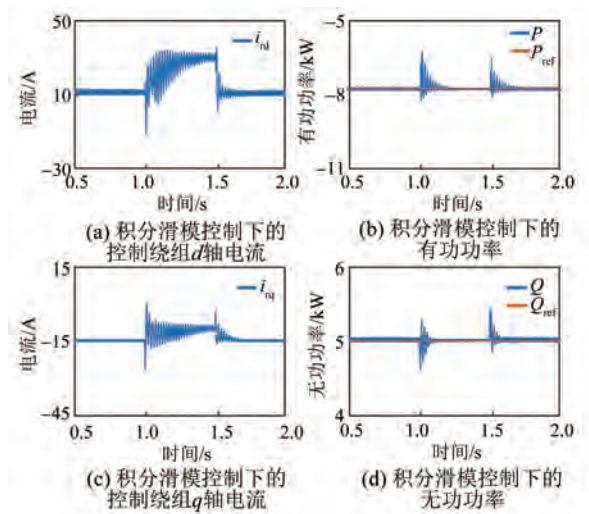


图9 低电压穿越控制下的CW电流与功率

由图9(a)可知,在0.5~1.0 s期间电网电压正常运行,CW电流保持恒定,幅值不变;在1.0~1.5 s期间,电网电压发生跌落,CW电流在1 s时发生变化,幅值经过短暂的调整后趋于稳定,与直接功率控制模式下的CW电流变化相比,低电压穿越模式下的CW电流具有变化小、响应快、恢复稳态时间短等特点;在1.5~2.0 s期间,电网电压恢复正常工作,CW电流经过短暂的动态调整,恢复至直接功率控制模式下的稳定运行状态。

图9(b)为电网电压跌落下BDFRG低电压穿越控制系统输出的有功功率与无功功率。通过观察功率波形曲线可知,在0.5~1.0 s期间直接功率控制系统作用于功率控制,系统输出的有功功率、无功功率均能较好地跟踪给定功率;在1.0~1.5 s期间电网电压发生跌落,此时电网电压幅值检测模块响应,BDFRG直接功率控制模式切换为低电压穿越控制模式,在电网电压跌落瞬间,低电压穿越控制模式瞬间作出响应,经过较短的动态变化,有功功率、无功功率均可跟踪给定功率;在1.5~2.0 s期间,电网电压恢复正常运行,系统控制模块切换为直接功率控制模式,有功功率、无功功率恢复正常运行控制状态。

#### 4 试验验证

为进一步验证所推导的PW磁链和CW电压动态变化过程的正确性并研究本文所提电网电压跌落下无刷双馈发电机低电压穿越控制策略,搭建如图10所示的硬件在环试验平台。



图10 硬件在环试验平台

该平台采用NI公司PXIe-1071作为控制器和试验主电路搭建载体,控制芯片型号为Xilinx K7-160T FPGA,示波器为力科MDA805A。在软件StartSim中搭建BDFRG主电路,启动StarSimHIL软件将主电路和控制电路结合。在电网电压跌落下BDFRG暂态分析的试验中,试验程序设计可以借助MATLAB/Simulink平台搭建的控制电路进行程序转化。

基于上述试验平台,模拟电网电压跌落下BDFRG暂态过程期间,PW和CW电压、电流的动态变化过程。在电网电压部分跌落( $\alpha=0.5$ )期间,PW电压、电流如图11所示,CW电压在亚同步运行模式与超同步运行模式的试验波形如图12所示。

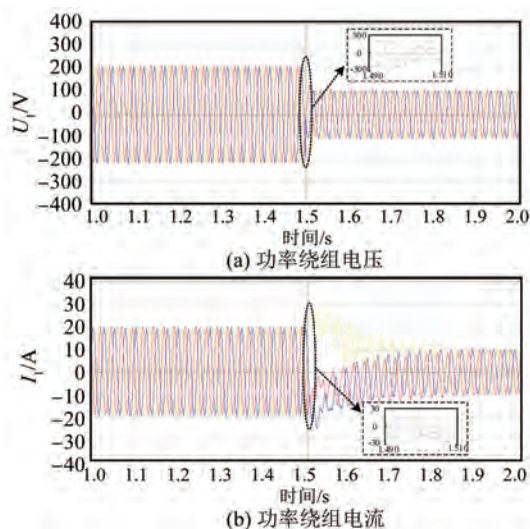


图11 电网电压跌落下PW电压电流波形

图13为BDFRG直接功率控制下的电流与功率。在1.0~1.5 s间发生电网电压跌落,由图13(a)和(c)可知,BDFRG的CW电流在1.0 s时瞬

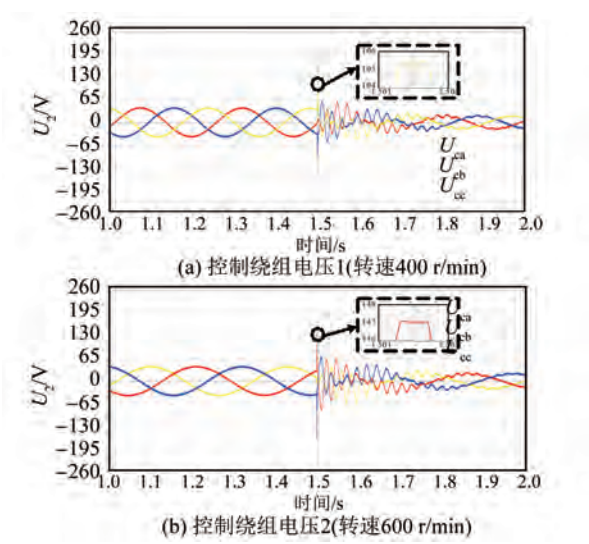


图 12 电网电压跌落下的 CW 电压波形

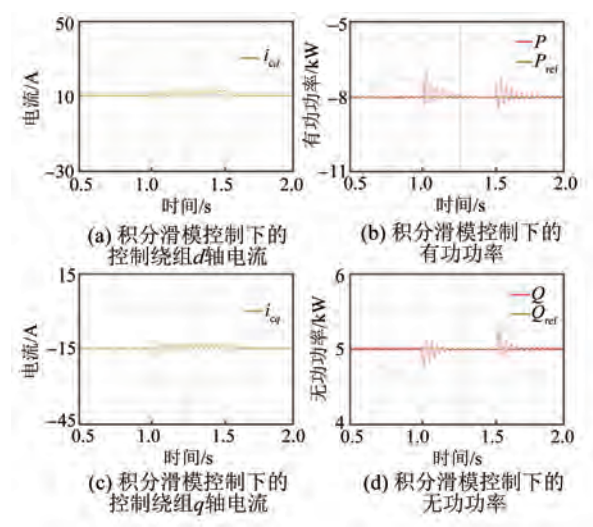


图 14 BDFRG 低电压穿越控制

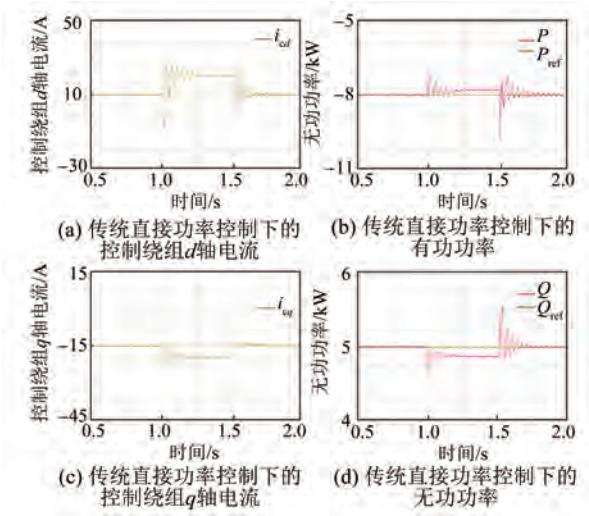


图 13 BDFRG 直接功率控制

间变化,电流幅值经短暂振荡后趋于稳定,1.5 s 时电网电压恢复,CW 电流幅值维持原来运行状态。图 13(b)和(d)中有功功率、无功功率在电网电压跌落期间无法跟踪给定功率,1.5 s 时电网电压恢复,有功功率、无功功率较好地跟踪了给定功率,系统正常运行。

图 14 为 BDFRG 低电压穿越控制下的电流和功率。在 1.0~1.5 s 发生电网电压跌落,由图 14 (a)和(c)可知,在 1.0 s 时 BDFRG 的 CW 电流快速调整,电流幅值经较小变化后维持稳定运行,1.5 s 时电网电压恢复,CW 电流恢复正常运行。图 14(b)和(d)中有功功率、无功功率在电网电

压跌落期间仍能较好地跟踪给定功率,完成电网电压跌落期间 BDFRG 的低电压穿越。

5 结 语

本文在电网电压跌落下,对 BDFRG 的 CW、PW 电压和电流进行暂态分析。基于 BDFRG 两相静止坐标系下的数学模型,推导分析了电网电压跌落下,PW 的磁链和 CW 电压的动态变化过程,并在此基础上提出一种积分滑模直接功率控制与低电压穿越控制相结合的控制策略。

通过仿真分析与试验结果可知,在电网电压跌落期间,PW 电压瞬间跌落且频率增大,CW 电压幅值变化的大小与转子转速有关。在该控制策略中 CW 电流具有幅值变化小、动态响应快等特点,可有效降低不平衡电网电压对 BDFRG 造成的影响,且在电网电压跌落期间,BDFRG 输出有功功率、无功功率仍能较好地跟踪给定功率,提高 BDFRG 风力发电机组的低电压穿越能力。

【参考文献】

[ 1 ] 覃盛琼,程朗,何占启,等. 风力发电系统研究与应用前景综述[J]. 机械设计,2021,38(8): 1.  
[ 2 ] 姚钢,杨浩猛,周荔丹,等. 大容量海上风电机组发展现状及关键技术[J]. 电力系统自动化,2021,45(21): 33.  
[ 3 ] PENG X K, LIU Z C, JIANG D. A review of multiphase energy conversion in wind power generation[J]. Renewable and Sustainable Energy

- Reviews, 2021, 147: 111172.
- [ 4 ] 邓先明, 姜建国. 无刷双馈电机的工作原理及电磁设计[J]. 中国电机工程学报, 2003(11): 130.
- [ 5 ] ABDELKADER M I, ABDELSALAM A K, ELDIN A A H. Vector controlled brushless doubly fed twin stator cascaded induction generator for variable speed wind generation connected to weak grids [ C ] // 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), 2015.
- [ 6 ] ZHANG J, BAI L, LI Q. The vector control research of brushless doubly-fed shaft generator for running independently [ C ] // 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2015.
- [ 7 ] 张凤阁, 王凤翔, 徐隆亚. 磁阻和笼型转子无刷双馈电机的统一等效电路和转矩公式[J]. 中国电机工程学报, 1999(11): 29.
- [ 8 ] HU S, ZHU G R, KANG Y. Modeling and coordinated control design for brushless doubly-fed induction generator-based wind turbine to withstand grid voltage unbalance [ J ]. IEEE Access, 2021, 9: 63331.
- [ 9 ] 张晓英, 程治状, 李琛, 等. 直驱永磁风力发电系统在不对称电网故障下的电压稳定控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 17.
- [ 10 ] ZHOU L, LIU J, ZHOU S. Improved demagnetization control of a doubly-fed induction generator under balanced grid fault [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(12): 1.
- [ 11 ] CUI J, GAO X, XIE Z, et al. Fault ride-through control strategy of doubly-fed wind turbine under symmetrical grid faults [ C ] // 2021 IEEE 16th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2021.
- [ 12 ] HANG C, WANG X, LIU N, et al. Virtual inductance control strategy for brushless doubly-fed induction generator during grid voltage dips [ C ] // 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2018.
- [ 13 ] XU L, CHENG M, WEI X, et al. Control and operation of brushless doubly-fed induction generator under unbalanced network [ C ] // 2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2020.
- [ 14 ] CHEN J, WEI Z, CHEN B, et al. Improved vector control of brushless doubly-fed induction generator under unbalanced grid conditions for offshore wind power generation [ J ]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(1): 293.
- [ 15 ] SHI J, LI M, ZHU L, et al. Direct power control strategy on grid and machine sides of open-winding brushless doubly-fed wind power generator system [ C ] // 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017.
- [ 16 ] 黄长喜, 阚超豪, 任泰安, 等. 磁阻式无刷双馈电机的转子结构及其性能分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊2): 26.
- [ 17 ] 金石, 王中正, 王代睿, 等. 基于功率误差比较的开绕组无刷双馈发电机直接功率控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 50.
- [ 18 ] 魏新迟, 许利通, 骆仁松, 等. 考虑饱和效应的无刷双馈发电机功率模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2021, 36(17): 3721.

## [ 主要栏目 ]

- 控制与应用技术
- 研究与设计
- 故障诊断与保护
- 新能源发电与局域电网
- 新能源汽车技术
- 发电机组及其控制
- 测试技术与测控系统
- 材料与工艺
- 电机生产及质量管理
- 电力电子变流器技术
- 智能制造
- 节能应用
- 实用技术成果