

不对称故障下海上风力发电机组并网稳定性研究

李文涛, 李荧晨

(江苏广恒新能源有限公司, 江苏 南通 226400)

摘要: 针对海上风电场送出线路发生不对称故障(如单相接地、两相短路)时, 风力发电机组并网点电压不平衡度骤升、无功功率波动加剧、可能导致并联电容器组等无功补偿设备过电压损坏的问题, 本文以如东海上风电场 SWT-4.0-146 型鼠笼异步风力发电机为研究对象, 研究了不对称故障下全功率变流器的并网稳定性机理。首先, 建立鼠笼异步发电机及其全功率变流器在三相静止坐标系、两相静止坐标系及同步旋转坐标系下的数学模型, 推导负序分量对直流母线电压及并网电流的影响规律; 其次, 基于对称分量法分析不对称故障期间正、负序分量的耦合关系, 揭示有功/无功功率二倍频波动及其对直流母线电压稳定性的影响机理; 然后, 在 MATLAB/Simulink 中搭建包含风力发电机组、LCL 滤波器、并网变压器及故障点的综合仿真模型, 模拟 A 相电压跌落至 0.2pU 的单相接地故障工况; 最后, 对比分析负序电流抑制前后的系统响应。仿真结果表明: 不对称故障发生时, 并网 A 相电流由额定值 1.2 kA 骤升至 2.8 kA, 负序电流含量达 11.15 A; 采用正负序分离控制后, 负序电流可降至 0.46 A, 降幅达 95.9%, 直流母线电压二倍频波动被抑制在设定值的 1% 以内。研究表明, 所提正负序解耦控制策略能有效抑制负序电流和直流母线电压波动, 显著提升不对称故障下风电并网系统的稳定性, 同时降低并联电容器组在故障期间的过电压风险, 为海上风电场无功补偿设备的配电保护装置及故障穿越策略优化提供了理论依据。

关键词: 不对称故障; 鼠笼异步风力发电机; 全功率变流器; 并网稳定性; 负序分量; 电压不平衡; 无功补偿

Study on Grid-Connected Stability of Squirrel-Cage Induction Wind Farm under Asymmetric Faults and Its Influence on Reactive Power Compensation Equipment

Li Wentao, Li Yingchen

(Jiangsu Guangheng New Energy Co., Ltd., Nantong 226400, China)

Abstract: To address the issues of a sharp increase in voltage imbalance at the grid connection point of wind turbines, intensified reactive power fluctuations, and potential overvoltage damage to reactive power compensation equipment such as shunt capacitor banks when asymmetric faults (e.g., single-phase grounding, two-phase short circuit) occur on offshore wind farm transmission lines, this paper takes the SWT-4.0-146 squirrel-cage asynchronous wind turbine at Rudong Offshore Wind Farm as the research object and investigates the grid-connected stability mechanism of the full-power converter under asymmetric faults. First, mathematical models of the squirrel-cage asynchronous generator and its full-power converter in the three-phase stationary coordinate system, two-phase stationary coordinate system, and synchronously rotating coordinate system are established, and the influence laws of negative sequence components on DC bus voltage and grid-connected current are derived. Second, based on the symmetrical component method, the coupling relationship between positive and negative sequence components during asymmetric faults is analyzed, revealing the mechanism of double-frequency fluctuations in active/reactive power and their impact on DC bus voltage stability. Then, a comprehensive simulation model including the wind turbine, LCL filter, grid-connected transformer, and fault point is built in MATLAB/Simulink to simulate a single-phase grounding fault condition where phase A voltage drops to 0.2 pU. Finally, the system response before and after negative sequence current suppression is compared and analyzed. Simulation results show that when an asymmetric fault occurs, the grid-connected phase A current surges from the rated value of 1.2 kA to 2.8 kA, with a negative sequence current content of 11.15 A. After adopting positive-negative sequence decoupling control, the negative sequence current can be reduced to 0.46 A, a reduction of 95.9%, and the double-frequency fluctuation of the DC bus voltage is suppressed within 1% of the set value. The research demonstrates that the proposed positive-negative sequence decoupling control strategy can effectively suppress negative sequence current and DC bus voltage fluctuations, significantly enhance the stability of wind power grid-connected systems under asymmetric faults, and reduce the overvoltage risk of shunt capacitor banks during fault periods, providing a theoretical basis for the protection configuration and fault ride-through strategy optimization of reactive power compensation equipment in offshore wind farms.

Key words: asymmetric fault; squirrel-cage asynchronous wind turbine; full-power converter; grid-connected stability; negative sequence component; voltage imbalance; reactive power compensation

0 引言

根据相关机构估算, 我国海上风能可开发利用总量约为 11 亿 kWh, 风能资源十分丰富[1-2]。2024 年全国新能源装机总量占比已达到总装机容量的 50%。可再生能源具有波动性和不确定性, 其上网电量随时间的变化曲线与系统负荷曲线存在较大差异, 大规模并网对电网系统的稳定运行带来巨大挑战[3]。

如东海上风电场采用上海电气 SWT-4.0-146 型鼠笼异步风力发电机。该机组采用全功率变流器进行励磁及并网, 发电机与电网之间没有直接电气连接, 电网波动不会直接作用于发电机, 具备较好的电压穿越特性。根据 GB/T 19963.2-2024《风电场接入电力系统技术规定 第 2 部分: 海上风电》的要求[4], 风电场汇集点

电压跌至 0 时,风力发电机组及无功补偿装置应能够不脱网连续运行 250 ms;电压跌至标称电压的 20% 时,应能够不脱网连续运行 625 ms。该机组的低电压穿越能力能够满足国标要求,但输电网络的不对称故障仍对机组稳定运行产生威胁[5-6]。

在风电场并网点附近发生不对称故障时,电网电压的不平衡度显著升高。根据对称分量法,不平衡电压可分解为正序、负序和零序分量。由于风电场升压变压器采用 Dyn11 接线方式,高压侧三角形接线可有效抑制零序分量,因此不对称故障的影响主要体现在正序和负序分量上。负序分量会导致三相异步发电机的全功率变流器输出电流出现不平衡,不仅可能损坏变流器功率器件,还可能对风机机械组件构成威胁。此外,不对称故障还会导致并网点电压出现二倍频波动,进而影响并联电容器组等无功补偿设备的安全运行[7-8]。

目前,针对不对称故障下风机并网稳定性的研究主要集中在双馈感应发电机(DFIG)上,对鼠笼异步发电机(SCIG)的相关研究相对较少[9-10]。文献[11-12]研究了不对称故障下双馈风机的转子侧变流器控制策略;文献[13-14]分析了弱电网条件下负序控制对风机阻抗特性的影响;文献[15-16]探讨了 STATCOM 对风机低电压穿越能力的提升作用。然而,上述研究对不对称故障期间无功功率波动及其对并联电容器组等无功补偿设备影响的分析尚不充分。

本文以如东海上风电场 SWT-4.0-146 型鼠笼异步风力发电机为研究对象,建立全功率变流器在不对称故障条件下的数学模型,分析负序分量对直流母线电压和并网电流的影响机理,提出正负序解耦控制策略,并通过 MATLAB/Simulink 仿真验证所提策略的有效性。研究成果可为海上风电场并联电容器组的保护配置及故障穿越策略优化提供理论依据。

1 鼠笼异步风力发电机系统建模

1.1 风机基本参数

如东海上风电场采用 50 台 SWT-4.0-146 型鼠笼异步风力发电机,单机额定功率 4 MW,额定输出电压 690 V,切入风速 3 m/s,额定风速 10.2 m/s,切出风速 25 m/s。风机采用变速变桨功率调节模式,在风速大于额定风速时通过改变叶片桨距角稳定输出功率。发电机通过全功率变流器与电网连接,标准空气密度 (1.225 kg/m^3) 条件下的机组标准功率曲线如图 1 所示。

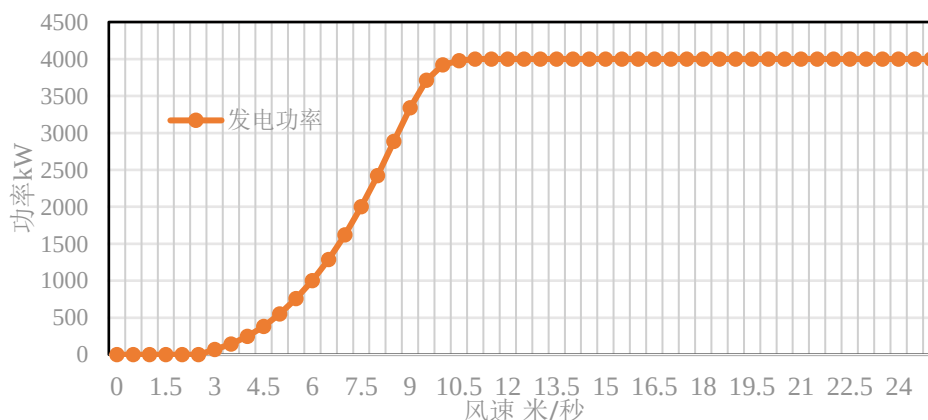


图 1 SWT-4.0-146 机组标准功率曲线

Fig.1 Standard power curve of SWT-4.0-146 wind turbine

仿真模型为 220kV 的输电线路、风场海上升压站(一台)、各风力发电机组升压变压器、机组全功率变流器、异步电动机、风机的转矩曲线。利用 MATLAB/Simulink 搭建并网风力发电系统的仿真模型,SWT-4.0-146 系统仿真参数如表 1 所示。

1.2 异步发电机数学模型

鼠笼异步发电机转子无绕组,无需集电环系统,维护工作量小。定子绕组为角接,无需中性点接地。在任意参考坐标系下,发电机的定子和转子电压方程可表示为[17]:

表1 SWT-4.0-146鼠笼异步发电机仿真参数

Table 1 Simulation parameters of SWT-4.0-146 squirrel-cage asynchronous generator

序号	参数名称	参数单位	参数数值
1	机端额定电压	kV	0.69
2	额定功率	MW	4.0
3	额定容量	MVA	4.25
4	切入风速	m/s	3.0
5	额定风速	m/s	10.2
6	切出风速	m/s	25.0
7	定子电阻	pu	0.0103
8	转子电阻	pu	0.01718
9	激磁电抗	pu	7.8
10	转子惯性时间常数	s	0.79

$$\begin{cases} \dot{U}_s = R_s \dot{I}_s + \nabla \dot{\lambda}_s + j\omega \dot{\lambda}_s \\ \dot{U}_r = R_r \dot{I}_r + \nabla \dot{\lambda}_r + j(\omega - \omega_r) \dot{\lambda}_r \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\dot{U}_s$ 、 $\dot{U}_r$ 为定子和转子电压矢量; $\dot{I}_s$ 、 $\dot{I}_r$ 为定子和转子电流矢量; $\dot{\lambda}_s$ 、 $\dot{\lambda}_r$ 为定子和转子磁链矢量; R_s 、 R_r 为定子和转子绕组电阻; ω 为风力发电系统的功率变换与控制任意参考坐标系下的转速(rad/s); ω_r 为转子电角速度。式(1)右侧的项 $j\omega \dot{\lambda}_s$ 和 $j(\omega - \omega_r) \dot{\lambda}_r$ 被称作“速度电压”, 它是由以任意速度 ω 旋转的参考坐标系产生的。

定子磁链 $\dot{\lambda}_s$ 和转子磁链 $\dot{\lambda}_r$ 方程可由等式(2)表示;

$$\begin{cases} \dot{\lambda}_s = (L_{ls} + L_m) \dot{I}_s + L_m \dot{I}_r = L_s \dot{I}_s + L_m \dot{I}_r \\ \dot{\lambda}_r = (L_{lr} + L_m) \dot{I}_r + L_m \dot{I}_s = L_r \dot{I}_r + L_m \dot{I}_s \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, L_s 为定子自感, $L_{ls} + L_m = L_s$; L_r 为转子自感, $L_{lr} + L_m = L_r$; L_{ls} 、 L_{lr} 分别为定子和转子漏感; L_m 为励磁电感。转子机械速度的动态行为与机械转矩和电磁转矩之间的关系如等式(3)所示。

$$\begin{cases} J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_m \\ T_e = \frac{3P}{2} \text{Re}(j\dot{\lambda}_s \dot{I}_s^*) = -\frac{3P}{2} \text{Re}(j\dot{\lambda}_r \dot{I}_r^*) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, J 为转子的转动惯量; P 为极对数; T_m 为发电机轴的机械转矩; T_e 为电磁转矩; ω_m 为转子机械速度($\omega_m = \omega / P$)。

根据上述三个方程, 可以建立鼠笼式异步电机的空间矢量等效电路模型如图2所示。

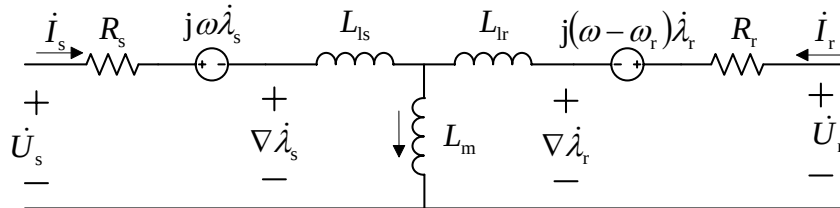


图2 鼠笼式异步电机的空间矢量等效电路模型

Fig. 2 Space-vector Equivalent Circuit Model for Squirrel Cage Asynchronous Motor

为获得静止参考坐标系下的异步发电机模型, 可将图2给出的任意坐标系下的转速设为0, 这是由于此时的静止坐标系不在空间中旋转; 另由于笼型异步发电机中的转子电路处于短路状态, 这里将其转子电压设置为0。

1.3 全功率变流器数学模型

SWT-4.0-146全功率变流器主要由发电机侧变换器、直流母线、电网侧变换器三部分组成。变流器采用LCL滤波器与电网连接,拓扑结构如图3所示。

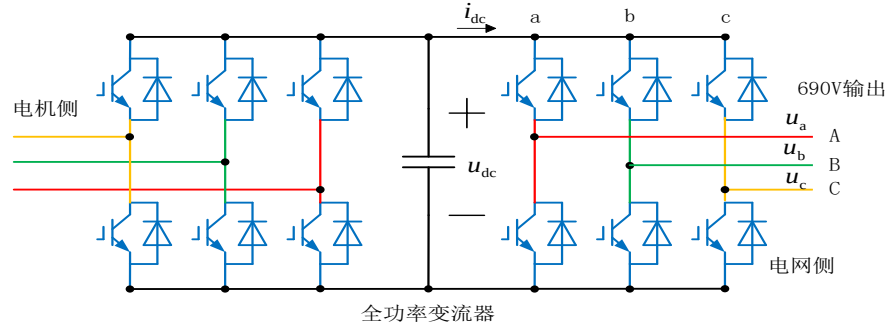


图3 全功率变流器并网拓扑结构

Fig. 3 Grid-connected topology of full-power converter

为简化分析,作如下假设:1)三相电网电压为纯正弦信号,运行中保持稳定;2)滤波电感为线性、非饱和元件;3)IGBT开关为理想器件,忽略损耗与延时。在三相静止坐标系下,网侧变流器的数学模型可表示为:

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = u_a - Ri_a - u_{ga} \\ L \frac{di_b}{dt} = u_b - Ri_b - u_{gb} \\ L \frac{di_c}{dt} = u_c - Ri_c - u_{gc} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} - s_a i_a - s_b i_b - s_c i_c \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, i_a, i_b, i_c 为变流器输出的电流, C 表示直流侧支撑电容, u_{ga}, u_{gb}, u_{gc} 表示风机并网点相电压。 u_a, u_b, u_c 输出电压的值可由逆变器交流侧端口电网电源中性点的电压表示。

$$\begin{cases} u_a = \frac{2}{3} u_{dc} s_a - \frac{1}{3} u_{dc} s_b - \frac{1}{3} u_{dc} s_c \\ u_b = \frac{2}{3} u_{dc} s_b - \frac{1}{3} u_{dc} s_a - \frac{1}{3} u_{dc} s_c \\ u_c = \frac{2}{3} u_{dc} s_c - \frac{1}{3} u_{dc} s_a - \frac{1}{3} u_{dc} s_b \end{cases} \quad (5)$$

为了对变流器进行降阶处理,需要对变流器进行坐标变换。先进行三相静止坐标到两相静止坐标变换,得到变流器在两相静止坐标系下的数学模型:

$$\begin{cases} L \frac{di_\alpha}{dt} = u_\alpha - Ri_\alpha - u_{g\alpha} \\ L \frac{di_\beta}{dt} = u_\beta - Ri_\beta - u_{g\beta} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} - \frac{3}{2} (s_\alpha i_\alpha - s_\beta i_\beta) \end{cases} \quad (6)$$

等式(6)中,下标 α, β 分别表示参量在 α 轴和 β 轴的分量; $i_\alpha, i_\beta, u_{g\alpha}, u_{g\beta}, s_\alpha, s_\beta$ 分别表示变流器电流、电网电压、开关信号。上述等式转换至dq选装坐标系下,可得到等式(7)。

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = u_d - Ri_d + \omega_1 Li_q - u_{gd} \\ L \frac{di_q}{dt} = u_q - Ri_q - \omega_1 Li_d - u_{gq} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} - \frac{3}{2}(s_d i_d - s_q i_q) \end{cases} \quad (7)$$

式中, d, q 表示该参量在 d, q 轴上的分量, i_d, i_q 为三相变流器电流, u_d, u_q 为电网电源, s_d, s_q 为开关信号。上述数学模型可作为本研究变流器的等效模型。

2 不对称故障下并网稳定性分析

2.1 不对称故障的对称分量描述

当风力发电机组并网点附近发生不对称故障(如单相接地短路、两相短路等)时,根据对称分量法,三相电气量可分解为正序、负序和零序分量。由于风电场升压变压器采用 Dyn11 接线方式,高压侧三角形接线可有效抑制零序分量,因此不对称故障对并网稳定性的影响主要体现在正序和负序分量上。

设并网点电压可表示为:

$$\begin{cases} u_a = U^+ \cos(\omega t + \theta^+) + U^- \cos(\omega t + \theta^-) \\ u_b = U^+ \cos(\omega t + \theta^+ - 120^\circ) + U^- \cos(\omega t + \theta^- + 120^\circ) \\ u_c = U^+ \cos(\omega t + \theta^+ + 120^\circ) + U^- \cos(\omega t + \theta^- - 120^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

式中: U^+, θ^+ 为正序电压的幅值和初相角; U^-, θ^- 为负序电压的幅值和初相角。

2.2 不对称故障下全功率变流器暂态特性

当电网电压跌落时,全功率变流器输出有功功率受阻。在控制器电流限幅环节的作用下,变流器输出功率进一步受限,导致功率环作用下功角持续增加,可能引发功角失稳。此外,在电网不对称故障下,变流器控制还面临输出电流越限、三相不平衡、输出功率存在二倍频波动等问题[18-19]。

电网发生不对称故障期间,根据对称分量法将不平衡电压分解为正、负、零序分量。根据瞬时功率理论可以推导出全功率变流器输出复功率 $\tilde{S}_e$ 可表示为:

$$+\tilde{S}_e = E_{a\beta} \tilde{I}_{a\beta} = (u_{dq}^+ e^{j\omega t} + u_{dq}^- e^{j\omega t})(i_{dq}^+ e^{j\omega t} + i_{dq}^- e^{j\omega t}) \quad (9)$$

将并网点正负序分量 $u_{dq}^+, i_{dq}^+, u_{dq}^-, i_{dq}^-$ 代入,可得有功功率和无功功率的表达式:

$$\begin{cases} P_e = \text{RE}(\tilde{S}_e) = p_0 + p_{c2} \cos(2t\omega) + p_{s2} \sin(2t\omega) \\ Q_e = \text{Im}(\tilde{S}_e) = q_0 + q_{c2} \cos(2t\omega) + q_{s2} \sin(2t\omega) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ q_0 \\ p_{c2} \\ p_{s2} \\ q_{c2} \\ q_{s2} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_d^+ & u_q^+ & u_d^- & u_q^- \\ u_q^+ & -u_d^+ & u_q^- & -u_d^- \\ u_d^- & u_q^- & u_d^+ & u_q^+ \\ u_q^- & -u_d^- & -u_q^+ & u_d^+ \\ u_q^- & -u_d^- & u_q^+ & -u_d^+ \\ -u_d^- & -u_q^- & u_d^+ & u_q^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \\ i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: p_0, q_0 为全功率变流器输出的有功功率及无功功率的均值,等式(10)-(11)表明:当电网发生不对称故障时,全功率变流器的输出瞬时功率会出现二倍频波动分量。输出功率波动会引发直流母线电压出现二倍频波动,导致变流器运行不稳定,进而影响并网系统的安全稳定运行。同时,这种二倍频无功功率波动会对并网点电压产生调制作用,可能引发电容器组的谐振过电压。

2.3 直流母线电压波动机理

直流母线电压的稳定性是衡量全功率变流器运行状态的关键指标。由功率平衡关系可得:

$$CU_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = P_{in} - P_{out} \quad (12)$$

式中: P_{in} 为变流器输入功率; P_{out} 为输出功率。

当输出功率存在二倍频波动时,直流母线电压将产生相应的波动。电压波动幅度与波动功率幅值成正比,与直流电容容值和电压等级成反比。若直流母线电压波动超过允许范围,将触发过压保护,导致风机脱网。此外,母线电压波动还会通过变流器控制回路传播至并网点,可能引发并联电容器组端电压的异常升高。

3 不对称故障下变流器故障分析

3.1 故障统计与分析

根据如东海上风电场 2025 年 1 月至 9 月的故障统计,全功率变流器相关故障共发生 31 次。故障原因包括:齿轮箱损坏、开关跳闸熔丝烧断、电抗器损坏、互感器损坏、连接线缆损坏、总断路器损坏、冷却风扇异常、通讯线路异常,以及高低压穿越过程中的过电流等。

由高低压穿越过程中过电流导致的变流器故障共发生 3 次,均为 35 kV 侧输电线路单相短路故障,风机最长停机时间超过 22 小时,单次最大电能损失达 2.2991 万 kWh。故障信息如表 2 所示。

表 2 电压穿越变流器故障信息

Table 2 Fault information of voltage ride-through converter

机位号	故障代码	故障名称	故障时间	原因分析	停运时长(h)
#16	30051	变流器总故障	2025/7/3	35kV 高低压穿越造成变频器三相过电流,主断路器跳闸;过电流导致拉弧	8.63
#31	30016	网侧模块故障	2025/6/26	IGBT 熔丝熔断;电压过高造成母排电弧	4.3
#16	30051	变流器总故障	2025/6/28	冷却风扇异常;通讯线路异常	22.5

3.2 过电流及拉弧机理分析

全功率变流器遭遇低电压穿越工况时,电网电压大幅跌落,导致变流器的输入输出条件急剧变化。为了维持一定的功率输出,电流会相应增大,当超过变流器额定电流承受范围时即形成过电流。过电流触发保护机制,变流器断开电路连接。

在电路断开瞬间,触头之间的电压足以击穿空气间隙,形成拉弧现象。拉弧不仅对触头造成严重烧蚀,还可能引燃周围绝缘材料,影响整个变流器系统的可靠性和安全性。因此,在全功率变流器的设计和运行中,必须充分考虑不对称故障导致的过电流及拉弧问题。

4 正负序解耦控制策略与仿真验证

4.1 正负序分离控制策略

为应对不对称故障工况,本文采用正负序分离控制方案。该方案的核心在于将电流中的正序分量与负序分量进行有效分离,然后分别进行独立控制。

控制器的基本原理基于派克变换:将三相静止坐标系下的电气量转换到旋转坐标系中,再利用陷波滤波器或延时信号消除法实现正负序分量的分离。分离后的正序和负序分量分别输入不同的控制器进行处理:

- 1)正序控制:维持变流器输出的有功功率和无功功率稳定,确保风力发电机持续向电网输送电能;
- 2)负序控制:抑制负序电流的产生,减少其对直流母线电压和并网电能质量的不良影响。

正负序分量的解耦控制可通过以下变换实现:

$$\begin{bmatrix} i_{dq}^+ \\ i_{dq}^- \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

(13)

其中变换矩阵 T 基于对称分量法构造,可实现正、负序分量在各自同步旋转坐标系下的独立提取。分离后的正序分量在 dq^+ 坐标系下表现为直流量,负序分量在 dq^- 坐标系下表现为直流量,从而可分别采用 PI 控制器实现无静差跟踪。

4.2 仿真模型与工况设置

利用 MATLAB/Simulink 搭建并网风力发电系统仿真模型,如图 4 所示。仿真中省略对主要研究影响较小的设备(部分二次侧设备、防雷设备、断路器、隔离开关等),保留 220 kV 输电线路、海上升压站、机组升压变压器、全功率变流器、异步发电机及风机转矩模型。

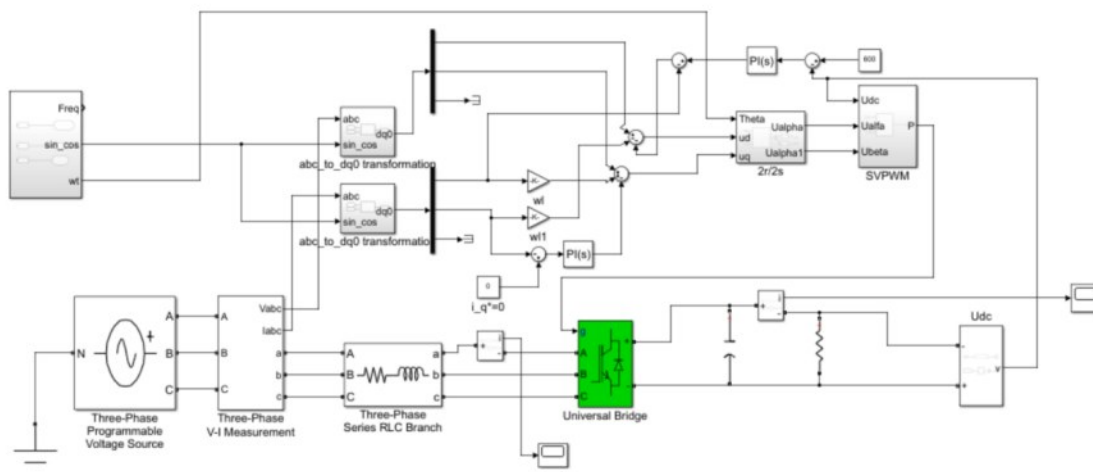


图 4 SWT-4.0-146 MATLAB/Simulink 仿真模型

Fig. 4 MATLAB/Simulink simulation model of SWT-4.0-146 wind turbine

仿真工况设置为:网侧 A 相电压在 1 s 时刻跌落至 0.2 pu,模拟单相接地不对称故障。系统响应分为三个阶段:

- 1 s-2 s:系统切换至低电压穿越控制,控制目标为抑制直流母线电压二倍频波动;
2 s-3 s:控制目标切换为抑制逆变器输出负序电流分量;
3 s:网侧电压恢复正常,故障穿越完成。

4.3 仿真结果分析

1) 输出电流响应

图5展示了不对称故障过程中全功率变流器输出电流的变化情况。

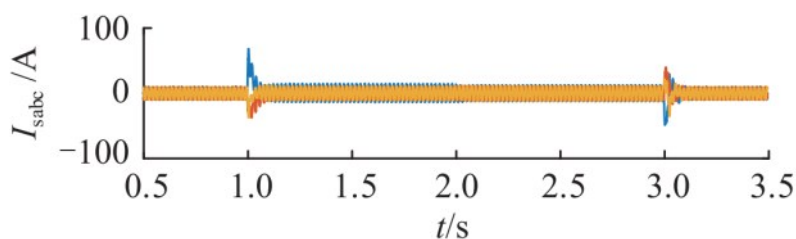


图5 全功率变流器输出电流(全时段)

Fig. 5 Output current of full-power converter (full period)

图6为1.45 s-1.55 s时段三相电流的局部放大波形。

从图6可以看出,A相电流在故障期间明显升高,系统输出电流出现严重不均衡。故障前A相电流约为

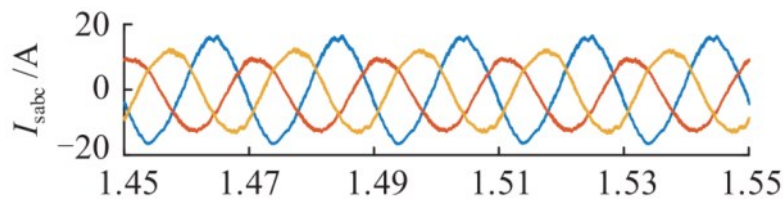


图6 1.45 s - 1.55 s全功率变流器输出电流

Fig. 6 Output current of full-power converter from 1.45 s to 1.55 s

1.2 kA(额定值),故障期间峰值电流达到约 2.8 kA,增幅超过 130%。

2)负序电流抑制效果

在 2 s - 3 s 时段(负序电流抑制工况下),变流器输出电流波形如图 7 所示。

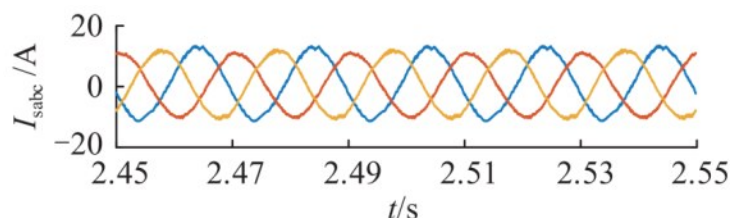


图7 负序电流抑制工况下全功率变流器输出电流

Fig. 7 Output current of full-power converter under negative sequence current suppression condition

负序电流抑制策略投入后,负序电流含量由 11.15 A 降至 0.46 A,降幅达 95.9%。此时风力发电机能够维持并网发电,表明所提控制策略对负序电流具有显著的抑制效果。

3)直流母线电压响应

全功率变流器直流侧母线电压波形如图 8 所示。

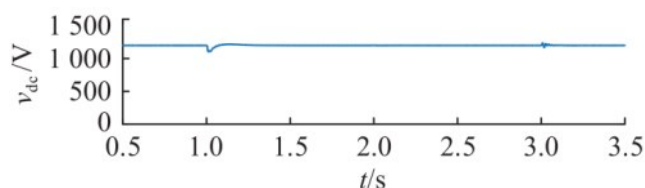


图8 全功率变流器直流母线电压(全时段)

Fig. 8 DC bus voltage of full-power converter (full period)

直流母线电压在 2.5 s 时刻的局部放大波形如图 9 所示。

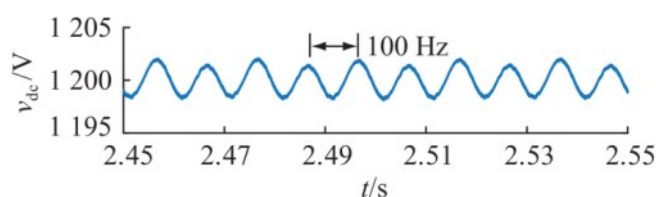


图9 2.5 s 时刻直流母线电压波动情况

Fig. 9 DC bus voltage fluctuation at 2.5 s

仿真结果表明:直流母线电压存在较小的二倍工频波动,但波动范围小于设定值的 1%,符合设备运行规定。在整个故障穿越过程中,风机输出功率保持 3.5 s 稳定输出,系统电压标幺值始终保持在国标规定的电压轮廓线以上,风力发电机系统未发生脱网。

4.4 仿真结果讨论

综合上述仿真结果,可得出以下结论:

快速响应能力:系统在不对称故障发生瞬间(1 s)能够从正常运行模式快速切换至低电压穿越控制模式,确保故障初期采取有效控制策略。

负序电流抑制效果显著:采用正负序解耦控制后,负序电流含量从 11.15 A 降至 0.46 A,降幅达 95.9%,有效改善了并网电流的不平衡度。

直流母线电压稳定:二倍频波动被抑制在设定值的 1% 以内,满足设备安全运行要求。直流母线电压的稳定也意味着并网点电压的稳定,从而降低了并联电容器组等无功补偿设备的过电压风险。

故障穿越能力达标:在整个故障过程中,系统电压标幺值保持在国标规定的电压轮廓线以上,风力发电机系统成功实现不脱网连续运行。

表3 控制策略投入前后关键参数对比
Table 3 Comparison of key parameters before and after control strategy activation

参数	控制前	控制后	改善幅度
A相故障峰值电流	2.8 kA	1.6 kA	↓ 42.9%
负序电流含量	11.15 A	0.46 A	↓ 95.9%
直流母线电压波动	2.80%	<1%	↓ 64.3%
并网运行状态	波动较大	稳定运行	—

5 结论

本文以如东海上风电场 SWT-4.0-146 型鼠笼异步风力发电机为研究对象,建立了不对称故障下全功率变流器的数学模型,分析了负序分量对直流母线电压和并网电流的影响机理,提出了正负序解耦控制策略,并通过仿真验证了其有效性。主要结论如下:

- 1)揭示了不对称故障下全功率变流器的功率波动机理。当电网发生不对称故障时,全功率变流器的输出功率会出现二倍频波动分量,进而引发直流母线电压的二次波动,影响系统稳定运行。同时,无功功率的二倍频波动会对并网点电压产生调制,可能引发电容器组过电压。
- 2)建立了考虑正负序解耦的全功率变流器数学模型。基于对称分量法,推导了正、负序分量在同步旋转坐标系下的解耦表达式,为不对称故障下变流器控制策略的设计提供了理论基础。
- 3)提出了面向不对称故障的正负序分离控制策略。通过将正序分量与负序分量分别独立控制,在有效抑制负序电流的同时维持有功功率的稳定输出。仿真结果表明:该策略可将负序电流含量从 11.15 A 降至 0.46 A,降幅达 95.9%;直流母线电压二倍频波动被抑制在设定值的 1% 以内。
- 4)验证了所提策略对无功补偿设备保护的积极意义。直流母线电压的稳定有效抑制了并网点电压波动,降低了并联电容器组在不对称故障期间的过电压风险,为海上风电场无功补偿设备的保护配置及故障穿越策略优化提供了理论依据。

后续研究将结合风电场实际运行数据开展多轮现场测试,进一步验证所提策略在不同故障类型、不同故障位置、不同输出功率工况下的适应性,并深入研究不对称故障期间无功功率波动与并联电容器组谐波过电压之间的定量关系。

参考文献:

[1] WALLIN M R. 风能在中国的发展状况及其预测[D]. Columbus: The Ohio State University, 2010.

[2] 李永东,许烈,马宏伟. 风力发电系统综述[J]. 电气时代, 2012,3: 42-47.

LI Yongdong, XU Lie, MA Hongwei. Review of wind power generation system[J]. Electric Age, 2012, 3: 42-47.

[3] 杨美颖,刘文颖,申自裕,等. 基于改进 DNE 极限域的含光热发电系统风光电消纳能力的评估方法[J]. 可再生能源, 2023,41(4): 546-554.

YANG Meiyong, LIU Wenying, SHEN Ziyu, et al. Evaluation method of wind and photovoltaic power accommodation capacity of power system with concentrated solar power based on improved DNE limit domain[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(4): 546-554.

[4] GB/T 19963.2-2024 风电场接入电力系统技术规定 第2部分:海上风电[S]. 北京:中国标准出版社, 2024.

[5] 徐海亮,陈翔宇,葛平娟. 不对称弱电网下双馈风机系统的稳定性评估及正负序虚拟转子电感控制策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(9): 49-56.

XU Hailiang, CHEN Xiangyu, GE Pingjuan. Stability evaluation of DFIG system under asymmetric weak grid and positive-negative sequence virtual rotor inductance control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(9): 49-56.

[6] 宋平岗,喻冲. 不对称故障下双馈风力发电机转子变换器控制研究[J]. 大电机技术, 2011(5): 55-59.

SONG Pinggang, YU Chong. Research on rotor converter control of DFIG under asymmetric faults[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2011(5): 55-59.

[7] 罗浩,刘守豹,曾恕嘉. 基于 STATCOM 的双馈风力发电机低电压穿越能力分析[J]. 电工技术, 2024(10): 46-

- 48, 52.
- LUO Hao, LIU Shoubao, ZENG Shujia. Analysis of low voltage ride-through capability of DFIG based on STATCOM[J]. Electric Engineering, 2024(10): 46-48, 52.
- [8] 吴瀚, 徐海亮, 张利, 等. 弱电网下含负序控制的双馈风机阻抗建模及关键致稳因素评估[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2516-2528.
- WU Han, XU Hailiang, ZHANG Li, et al. Impedance modeling and key stabilization factor evaluation of DFIG with negative-sequence control under weak grid[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2516-2528.
- [9] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.
- LYU Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its application in microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [10] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 336-348.
- ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336-348.
- [11] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2998-3006.
- WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2998-3006.
- [12] 孙华东, 王宝财, 李志伟, 等. 高比例新能源接入下电力系统惯量水平评估与提升措施[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 37-45.
- SUN Huadong, WANG Baocai, LI Zhiwei, et al. Evaluation and enhancement measures of system inertia level under high penetration of renewable energy[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 37-45.
- [13] 杨沛豪, 赵俊杰, 吴昌兵, 等. 超级电容储能系统在火电调频与电网支撑中的集成技术及应用展望[J]. 电力电容器与无功补偿, 2026, 47(2): 1-17.
- YANG Peihao, ZHAO Junjie, WU Changbing, et al. Integrated technologies and application prospects of supercapacitor energy storage systems in thermal power frequency regulation and grid support[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2026, 47(2): 1-17.
- [14] 冯浩, 王博, 葛树俊, 等. 基于VSG的光储系统参与一次调频研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2): 1-7.
- FENG Hao, WANG Bo, GE Shujun, et al. Research on primary frequency regulation of photovoltaic-storage system based on virtual synchronous generator[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 1-7.
- [15] 黄伟, 熊显斐, 陈洁, 等. 基于SOC自适应调节的光储联合系统VSG控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 88-96.
- HUANG Wei, XIONG Xianfei, CHEN Jie, et al. VSG control strategy for PV-storage hybrid system based on SOC adaptive regulation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15): 88-96.
- [16] 肖湘宁, 罗超, 廖坤玉. 新能源电力系统次同步振荡问题研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 85-97.
- XIAO Xiangning, LUO Chao, LIAO Kunyu. Review of the research on subsynchronous oscillation issues in electric power system with renewable energy sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 85-97.
- [17] 张兴, 曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- ZHANG Xing, CAO Renxian. Solar photovoltaic grid-connected power generation and its inverter control[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [18] ZHONG Qingchang, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [19] LIU Jia, MIURA Y, ISE T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3600-3611.
- [20] BECK H P, HAUER R. Virtual synchronous machines—Classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids[C]//2013 IEEE Grenoble Conference. Grenoble: IEEE, 2013: 1-7.
- [21] WANG Weiyu, JIANG Lin, CAO Yijia, et al. A parameter alternating VSG controller of VSC-MTDC systems for low fre-

- quency oscillation damping[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4609-4621.
- [22] SUUL J A, LISERRE M, RODRÍGUEZ P. Instantaneous power control of grid-connected voltage source converters under unbalanced grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1218-1229.
- [23] ALEPUZ S, BUSQUETS-MONGE S, BORDONAU J, et al. Control strategies for asymmetric faults in grid-connected converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(6): 2806-2820.
- [24] MUYEEN S M, TAKAHASHI R, MURATA T, et al. A variable speed wind turbine control strategy to meet wind farm grid code requirements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 331-340.
- [25] MOHSENI M, ISLAM S M. Review of international grid codes for wind power integration: diversity, technology and a case for global standard[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(6): 3876-3890.
- [26] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77-81.
CHI Yongning, LIU Yanhua, WANG Weisheng, et al. Influence of wind power integration on power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 77-81.
- [27] 杭丽君,姚文熙,吕征宇. 并网逆变器在电网不平衡故障时的控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 119-125.
HANG Lijun, YAO Wenxi, LYU Zhengyu. Control strategy of grid-connected inverter under unbalanced grid faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 119-125.
- [28] IEEE Std 1459-2010. IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions[S]. New York: IEEE, 2010.
- [29] 曹云峰,蔡旭. 全功率变流器型风力发电系统的低电压穿越技术[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(19): 97-104.
CAO Yunfeng, CAI Xu. Low voltage ride-through technology for full-power converter wind power generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 97-104.
- [30] 赵栋利,许洪华. 鼠笼异步风力发电机组全功率变流器的研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(8): 1096-1101.
ZHAO Dongli, XU Honghua. Research on full-power converter for squirrel-cage induction wind turbine[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2009, 30(8): 1096-1101.
- [31] 陈坚. 电力电子学——电力电子变换和控制技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
CHEN Jian. Power electronics——power electronic conversion and control technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.
- [32] SWT-4.0-146 风力发电机组产品用户手册[Z]. 上海: 上海电气风电集团有限公司, 2018.