

# 故障下直驱风机频率变化特性及其影响因素分析

孙向飞,李平,达光军,窦小昌

(昆明理工大学 电力工程学院,云南 昆明 650500)

**摘要:**由于同步机具有很大的旋转惯性,故障导致的频率变化很小,而新能源旋转惯性较小,故障可能导致较大的频率变化,故障下频率的较大变化势必导致现有继电保护特性发生变化,现有文献鲜有针对故障情况下直驱风机频率变化特性的研究。针对这一问题,首先基于直驱风机单机无穷大系统,考虑网侧逆变器控制策略,推导分析了线路故障时电压、电流的相位变化特性,从而揭示了直驱风机频率变化的机理。然后,进一步考虑锁相环导致的锁相差对直驱风机频率响应特性的影响。最后,结合仿真分析了不同故障类型、不同故障持续时间、不同短路比等因素对频率变化特性的影响。理论分析和仿真表明:保护动作之前电压、电流相位超前的累积等效为频率的增加,锁相差导致频率变化特性更加复杂,不同故障工况下具有不同的频率变化特性。

**关键词:**直驱风机并网系统;相位变化;频率特性;锁相差

**中图分类号:**TM71 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26464

## Analysis of Frequency Variation Characteristics and Influencing Factors of PMSG Under Fault Conditions

SUN Xiangfei, LI Ping, DA Guangjun, DOU Xiaochang

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China)

**Abstract:** Due to the large rotational inertia of synchronous machines, frequency changes caused by faults are minimal. In contrast, new energy systems have smaller rotational inertia, which can result in more significant frequency variations during faults. These larger frequency fluctuations inevitably lead to changes in the characteristics of existing relay protection. There is limited research in the current literature on the frequency variation characteristics of PMSG under fault conditions. To address this issue, firstly, analyzed the phase variation characteristics of voltage and current during line faults based on a single direct-drive wind turbine system with an infinite bus, considering the grid-side inverter control strategy, thus revealing the mechanism of frequency changes in PMSG. Then the impact of the phase lock error induced by the phase-locked loop on the frequency response characteristics of the direct-drive wind turbine was considered. Finally, through simulation, the effects of different fault types, fault durations, and short-circuit ratios on frequency variation characteristics were analyzed. Theoretical analysis and simulations show that the phase lead of voltage and current before the protection action is cumulative and effectively equivalent to an increase in frequency. The phase-locked loop error makes the frequency variation characteristics more complex, and different fault conditions result in different frequency variation characteristics.

**Key words:** direct-drive wind turbines grid connection system; phase variation; frequency characteristics; phase-locked loop error

随着全球能源的变革,新能源发电得到了大力的发展,截至2023年,我国风电装机容量达到了4.4亿kW,同比增长了20.7%<sup>[1]</sup>。永磁直驱风机的(permanent magnet synchronous generator, PMSG)

**基金项目:**国家自然科学基金(52037003,51007035);云南省重大专项(202002AF080001)

**作者简介:**孙向飞(1977—),女,博士,副教授,主要研究方向为新型电力系统保护与控制,Email:83565755@qq.com

因其通过背靠背换流器接入交流电网,具有交直流隔离作用,能够增强PMSG系统的并网稳定性,这个优点使其成为了目前广泛采用的风力发电机型之一。但PMSG大量接入电网后,因其拥有大量的电力电子器件,存在低惯量和弱抗干扰性等问题,与传统的同步发电机相比输出特性发生了改变。系统发生故障时,PMSG的故障特性与变流器控制系统逻辑紧密相关,变得十分复杂<sup>[2]</sup>,与传统同步机故障特性不尽相同。

由于传统继电保护主要针对同步机故障特性进行整定,因此传统继电保护不再适用于PMSG并网系统,继电保护存在适应性问题<sup>[3]</sup>。当PMSG接入电网且发生故障时,传统的继电保护可能出现错误动作,威胁电网运行安全。所以为了保证风电机组和电力系统的安全稳定运行,深入研究短路故障条件下风电机组的暂态响应特性,具有极其重要的意义。诸多对于PMSG故障特性的分析研究,主要是从两方面进行,一方面是对PMSG故障电流特性的分析研究,另一方面则是对PMSG故障频率特性的分析研究。

针对PMSG故障电流特性的分析研究,文献[4-5]分析了风电场是一个典型的弱馈电源系统,其特性在于当系统遭遇接地故障时,风电场侧的保护装置所检测到的故障电流几乎完全由零序分量构成,而非故障相的电流与故障相的电流几乎保持一致,这种状况极大地影响了保护装置的准确动作。但是只是定性地分析了故障电流的变化,没有给出具体表达式。文献[6-8]对网侧变流器控制策略进行了适当的简化处理。根据变流器输入输出功率守恒的原则,推导出了PMSG故障电流的近似表达式。然而,在这一推导过程中,并未考虑锁相环(phase-locked loop, PLL)的动态响应过程,忽略了锁相差对故障电流可能产生的影响。文献[9-11]提出了一种综合考虑PMSG网侧变流器控制策略和PLL动态响应的暂态特

性分析方法。在发生对称短路故障时,更精确且全面地分析了实际弱电网系统中PMSG并网系统的故障电流特性,然后针对机端电压的幅值和相位暂态变化,建立了PMSG输出电流的暂态表达式,实现了对故障电流特性的深入剖析。

针对PMSG故障频率特性的分析研究,文献[12-14]建立了含PMSG的系统频率响应模型,提出了锁相暂态影响下系统频率变化率和最大频率偏差的计算方法,解析了电网故障下的系统暂态频率响应特性,但是没有对PMSG本身的频率响应特性进行分析研究。总之,上述文献对于PMSG系统故障特性的分析主要是推导出了故障电流的表达式,定性地分析了短路电流的影响因素和变化规律,集中于各种控制策略以及影响因素下的PMSG故障电流暂态特性理论推导与分析,和电网故障下的含有PMSG的系统暂态频率响应特性,对于外部故障时PMSG的频率响应特性鲜有文献进行分析研究。

针对上述不足,本文根据PMSG单机无穷大系统有功功率和相角的关系,结合并网逆变器的控制策略以及PMSG并网系统等值电路,分析了线路故障时PMSG的电压、电流相位变化,探索了PMSG的频率响应特性。同时考虑到锁相环响应特性,推导出锁相环在故障时刻的锁相差,分析了锁相差的存在对PMSG的频率响应特性的进一步影响。然后结合仿真分析了不同影响因素下的PMSG的频率变化特性,并且验证了本文所述的风机频率响应特性的正确性。

## 1 PMSG 并网系统控制策略

### 1.1 PMSG 并网系统结构

PMSG发电系统拓扑结构如图1所示。PMSG发电系统通过变流器背靠背与电网连接,主要由风力机、永磁同步发电机、双PWM全功率变流器、滤波系统等部分组成。双PWM全功率

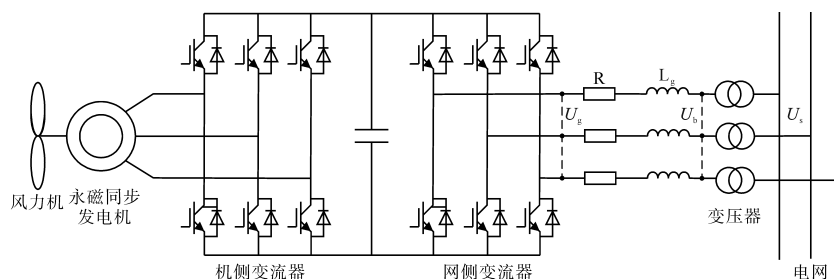


图1 永磁直驱式风力发电系统拓扑结构图

Fig.1 Topology of the direct-driven wind grid-connection system

变流器由机侧变流器和网侧变流器组成,机侧变流器通过调节PMSG的转速来改变输入有功功率的大小,而网侧变流器一般用来维持直流母线电压的稳定,按系统要求输出相应的有功功率和无功功率<sup>[15]</sup>。

## 1.2 PMSG 并网系统网侧变流器控制策略

PMSG 并网系统网侧变流器结构图如图 2 所示。

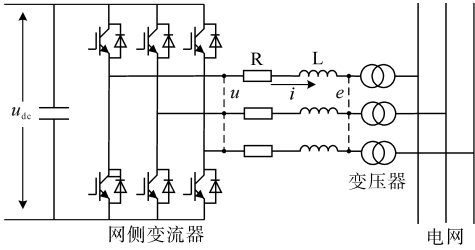


图2 PMSG 并网系统网侧变流器结构图

Fig.2 Structure of the grid-side converter in the PMSG grid connection system

由图 2 可知,PMSG 输出电压  $u$  和 PMSG 输出电流  $i$  之间的方程式为

$$u = L \frac{di}{dt} + Ri + e \quad (1)$$

式中: $L, R$  分别为滤波电感、滤波电阻; $e$  为并网电压。

转换到  $d-q$  坐标系下:

$$\begin{cases} u_d = e_d + Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega Li_q \\ u_q = e_q + Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega Li_d \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u_d, u_q$  分别为 PMSG 出口电压  $d, q$  轴分量; $i_d, i_q$  分别为 PMSG 输出电流  $d, q$  轴分量。

转换为由 PI 控制的控制方程:

$$\begin{cases} u_d = e_d + Ri_d - \omega Li_q + k_{pi}(i_d^* - i_d) + k_{ii} \int (i_d^* - i_d) dt \\ u_q = e_q + Ri_q + \omega Li_d + k_{pi}(i_q^* - i_q) + k_{ii} \int (i_q^* - i_q) dt \end{cases} \quad (3)$$

式中: $k_{pi}, k_{ii}$  分别为电流内环 PI 控制的比例、积分系数。

在双闭环结构中,为了维持直流电压的稳定,需采用直流电压外环进行控制,而该电压外环的输出便是  $d$  轴有功电流的参考值。根据直流输出功率等于逆变器输出功率,得到直流电压与  $d$  轴电流参考值的关系<sup>[16]</sup>:

$$i_d^* = k_{pv}(u_{dc} - u_{dc}^*) + k_{iv} \int (u_{dc} - u_{dc}^*) dt \quad (4)$$

式中: $u_{dc}$  为直流侧实际电压; $u_{dc}^*$  为直流侧参考电

压; $k_{pv}, k_{iv}$  分别为直流电压外环 PI 控制的比例、积分系数。

同时,当电网发生故障时,PMSG 并网系统需要一定的故障穿越能力,以此来改善逆变器的控制性能,保证 PMSG 可靠运行。当电网线路发生故障时,电网电压会发生下降,当电网电压下降较小时,PMSG 不会进入低电压穿越控制。当电压下降较大时,PMSG 进入低电压穿越控制,由外界给定  $i_d, i_q$  参考值<sup>[17]</sup>。一般给定为

$$\begin{cases} i_d^* = \sqrt{i_{max}^2 - i_q^{*2}} \\ i_q^* = K(0.9 - U)I_N \end{cases} \quad (5)$$

式中: $I_N$  为额定电流; $i_{max}$  为最大电流允许值,取值为  $1.1I_N$ ;  $K$  为无功电流比例系数,取值为  $1.5 \sim 3$ ;  $U$  为机端电压标么值。

为了实现低电压穿越,同时还需要在直流侧加入储能或耗能装置。当发生故障,风电机组并网电压发生跌落时,风电机组输入输出的不平衡功率会造成直流侧电压突增,这时需要加入储能或耗能装置进行稳压。最常见的是利用撬棒 (Crowbar) 电路消耗多余能量,当电网电压出现跌落时,及时接入电阻模块来消耗直流侧不平衡功率,加快直流侧母线电压恢复到设定值。

## 1.3 锁相环控制原理

当风电场连接的电网远端发生不对称故障导致三相电压不平衡时,由于直驱风力发电机组的并网逆变器直接与电网相联,并网逆变器须承受不平衡电压的冲击,会对其运行特性造成不利影响。因此在不平衡电网电压条件下,需要实现并网逆变器与电网的同步。通常采用锁相环来实现并网逆变器与电网的同步<sup>[18]</sup>。

根据锁相原理和坐标变换原则,只需将并网口电压经过  $d-q$  坐标变换,变换为  $d, q$  轴电压,然后控制  $q$  轴电压为零,即可使电网电压定向于  $d$  轴,锁定在  $d$  轴上。根据锁相原理可以得到经典的三相同步锁相环控制结构<sup>[19]</sup>,同时也是 PMSG 并网控制锁相环节的控制结构。

PLL 工作原理框图如图 3 所示,PLL 的输入为直驱风电机的并网点电压测量值  $U_b$ ,经同步坐标变换得到  $d, q$  轴电压,然后将  $q$  轴电压经积分控制和滤波器即可得到并网电压的相角,通过闭环控制将输出的并网电压相角反馈到同步坐标变换。当变流器稳态工作、并网口电压定向于  $d$  轴时, $q$  轴电压是为零的,因此只需控制  $q$  轴电压为

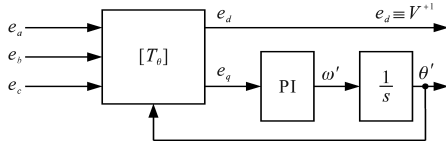


图3 锁相环工作原理框图

Fig.3 Block diagram of the phase-locked loop working principle  
零,就可以使电压  $U_b$  锁定在  $d$  轴,从而实现并网点电压实际相角的跟踪;闭环输出值  $d$  轴电压即为并网点电压幅值。

根据如图3所示三相同步锁相环控制结构可知,锁相环的典型基本结构传递函数为

$$e_q(k_p + \frac{k_i}{s}) = s\theta_{pll} \quad (6)$$

式中: $e_q$ 为并网点电压 $q$ 轴分量; $\theta_{pll}$ 为锁相环输出

相位; $k_p, k_i$ 为锁相环PI控制的比例、积分系数。

#### 1.4 PMSG 并网系统网侧逆变器控制框图

根据上述控制方程以及加入锁相控制环节后的电压定向双环控制框图如图4所示。根据电压外环得到的 $d$ 轴有功电流参考值与经过Park变换得到的并网口电流 $d$ 轴有功电流实际值做差;根据系统对无功的要求由外部给定的 $q$ 轴无功电流与经过Park变换得到的并网口电流 $q$ 轴无功电流实际值做差,将 $d, q$ 轴的电流差值经过PI控制,加入式(3)中所示的解耦前馈项,经过反馈控制即可得到输出控制量 $u_d$ 和 $u_q$ 。将 $u_d$ 和 $u_q$ 经过同步坐标反变换得到的 $u_a, u_b, u_c$ 输入电压源型并网逆变器进行控制,即可实现PMSG并网。

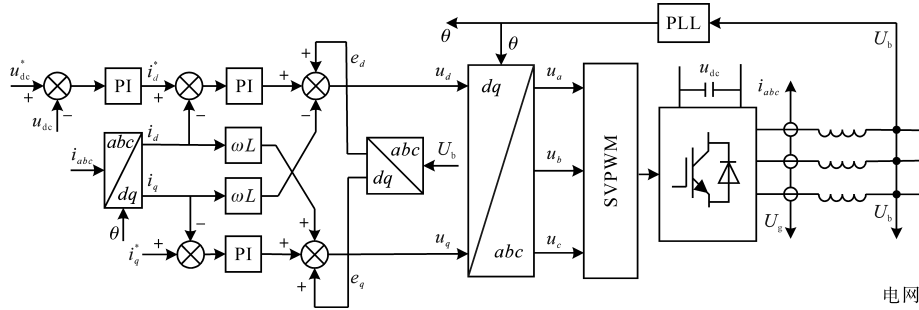


图4 PMSG网侧变流器电压定向双环控制框图

Fig.4 PMSG grid-side converter voltage-oriented double-loop control block diagram

## 2 线路故障时PMSG的频率响应特性分析

### 2.1 线路故障时PMSG输出特性分析

由图1可知,忽略电阻R的影响,将永磁直驱式风力发电系统简化等效为如图5所示电路图。

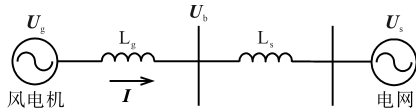


图5 简化等效电路图

Fig.5 Simplified equivalent circuit diagram

由图5可知:

$$U_b \frac{U_g - U_b}{jx} = P \quad (7)$$

式中: $U_g$ 为直驱同步风力发电机的等效内电势; $U_b$ 为PMSG并网点电压; $P$ 为PMSG实际输出功率; $x$ 为变流器连接电抗。

$U_b$ 与 $U_s$ 之间为送出线路,PMSG不能测量到 $U_s$ ,只能测量 $U_b$ 。

根据并网点的控制目标值 $P_{set}$ ,计算得到电流参考值 $i_d^*, i_q^*$ ,即需要向并网点注入的电流值。并网点的三相电流测量值 $i_{abc}$ 通过Park变换得到电

流当前值 $i_d, i_q$ 。 $i_d^*, i_q^*$ 与 $i_d, i_q$ 的差值作为PI反馈控制的输入,PI控制将输出内电势的电压变化量 $\Delta u$ 。根据并网点的电压测量值 $U_b$ 、三相电流测量值 $i_{abc}$ 及 $\Delta u$ ,计算得到 $d, q$ 轴电压 $u_d, u_q$ ,经Park反变换到三相坐标系,即获得直驱同步风力发电机的三相等效内电势当前值 $U_g$ 。

由直驱风机单机无穷大系统有功功率和相角的关系可知,有功功率 $P$ 与相角差 $\delta$ 的关系可以表示为

$$P = \frac{U_g U_b}{x} \sin\delta \quad (8)$$

式中: $\delta$ 为 $U_g$ 与 $U_b$ 的相角差。

有功功率和相角差的关系曲线如图6所示。

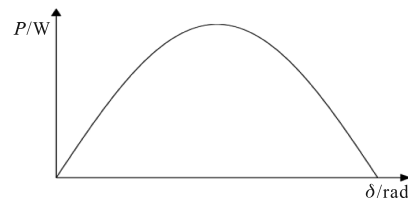


图6 直驱风机单机无穷大系统有功功率和相角差的关系曲线图

Fig.6 Relationship curve between active power and phase angle difference for a single direct-drive wind turbine in an infinite bus system

当电网中线路发生故障时,电网电压  $U_g$  跌落,导致并网口电压  $U_b$  减小,此时 PMSG 实际输出功率  $P$  减小。因为 PMSG 变流器控制为恒功率控制,设定有功功率目标值  $P_{set}$ ,此时 PMSG 实际输出功率达不到功率目标值  $P_{set}$ 。PMSG 输出为了达到设定功率目标值  $P_{set}$ ,就需要增加 PMSG 实际输出功率  $P$ ,根据图 6 可知,当增加输出功率  $P$  时,  $\delta$  增大,即  $U_g$  与  $U_b$  的相角差增大,因此 PMSG 的三相等效内电势  $U_g$  在经过风机网侧变流器在控制系统的一系列反馈控制作用下将发生相位超前,变为  $U'_g$ 。此时,并网点的电压测量值  $U_b$  和内电势当前值  $U'_g$  满足:

$$U_b \frac{U'_g - U_b}{jx} = P_{set} \quad (9)$$

### 2.2 线路故障时 PMSG 频率响应特性分析

图 5 所示 PMSG 并网等效电路图的等值电路图如图 7 所示。

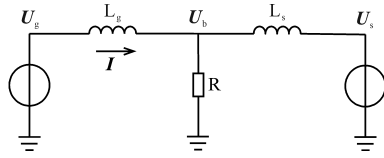


图 7 PMSG 等值电路图

Fig.7 Equivalent circuit diagram of PMSG

由图 7 可知:

$$U_g = U_b + j\omega L_g \cdot I \quad (10)$$

式中:  $I$  为 PMSG 注入电网电流;  $L_g$  为滤波器电感。

由式(10)可知,当  $U_g$  相位超前后,  $U_b$  的相位在电感以及电流未发生变化的情况下同样发生超前现象,变为  $U'_b$ ,此时经一轮反馈控制输出后的并网点的电压  $U'_b$  和内电势当前值  $U'_g$  不再满足式(9),则又进入下一轮的反馈控制。

根据式(10)可知 PMSG 注入电网的电流  $I$  为

$$I = \frac{U_g - U_b}{j\omega L_g} \quad (11)$$

由式(11)可知,当  $U_g$  和  $U_b$  的相位都发生超前的情况下, PMSG 注入电网的电流  $I$  的相位也在不断超前。

根据以上论述,得到 PMSG 的三相等效内电势  $U_g$ 、并网点的电压  $U_b$  和 PMSG 注入电网的电流  $I$  的相位变化相量图如图 8 所示。

由图 8 可知,当电网发生故障, PMSG 的三相等效内电势  $U_g$  因 PMSG 的实际输出功率  $P$  为了能达到设定功率目标值  $P_{set}$  而发生了相位超前变为  $U'_g$ ,同时又因为式(10)中  $U_g$  和  $U_b$  的关系,并网点的

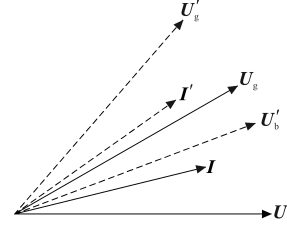


图 8  $U_g$ ,  $U_b$  和注入电流  $I$  的相位变化相量图

Fig.8 Phasor diagram of the phase variation of  $U_g$  and  $U_b$  and injected current  $I$

的电压测量值  $U_b$  同样发生了相位超前变为  $U'_b$ ,同样由于式(11)中  $U_g$ ,  $U_b$  和  $I$  的关系, PMSG 注入电网的电流  $I$  相位也随着  $U_g$  和  $U_b$  的相位超前而超前变为  $I'$ 。  $U_g$ ,  $U_b$  和  $I$  的相位会因为 PMSG 变流器恒功率控制不断超前,直到满足式(9)为止。

PMSG 注入电网电流表达式为

$$i = I_m \sin(\omega t + \theta) \quad (12)$$

根据上述分析可知,由于 PMSG 网侧变流器控制策略为恒功率控制,线路故障期间实际功率达不到设定功率目标值,并网点的电压及 PMSG 注入电网的电流相位不断超前。即电流相位的变化与时间有关,相角是时间的函数,电流相位变化前的角频率和相位角分别表示为  $\omega, \theta$ , 电流相位变化后的角频率和相位角分别表示为  $\omega', \theta'$ , 则有:

$$\omega t + \theta(t) = \omega' t + \theta'(t) \quad (13)$$

即

$$(\omega - \omega')t = \theta'(t) - \theta(t) \quad (14)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (15)$$

可见,相位的变化可等效为频率的变化,故保护动作之前时间内相位超前的累积等效为频率的增加。

### 2.3 锁相差对 PMSG 频率响应特性影响分析

设并网口电压幅值为  $e_m$ , 相位为  $\theta_0$ , 经过 Park 变换后得到  $e_{dq}$  的表达式为

$$e_{dq} = T_{2r/3s} e_{abc} = [e_m \cos(\theta_0 - \theta_{pll}) \quad e_m \sin(\theta_0 - \theta_{pll})] \quad (16)$$

根据式(16),将  $e_q$  代入式(6),并近似处理  $\sin(\theta) \approx \theta$ , 可以得到:

$$(\theta_0 - \theta_{pll}) e_m (k_p + \frac{k_i}{s}) = s \theta_{pll} \quad (17)$$

根据式(17)可知,锁相环输出的相位  $\theta_{pll}$  为

$$\theta_{pll}(s) = \theta_0(s) \frac{e_m k_p s + e_m k_i}{s^2 + e_m k_p s + e_m k_i} \quad (18)$$

当故障发生后,电网电压相位发生  $\Delta\theta$  跳变,将相位跳变转换至频域下为  $\Delta\theta/s$ 。将  $\Delta\theta/s$  代入式(18)后,可以求得锁相环输出的相位与实际相位

之间的偏差<sup>[20]</sup> $\Delta\theta_{pll}$ :

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{pll}(s) &= \frac{\Delta\theta}{s} \cdot \frac{e_m k_p s + e_m k_i}{s^2 + e_m k_p s + e_m k_i} \\ &= \frac{\Delta\theta(e_m k_p s + e_m k_i)}{s(s - s_1)(s - s_2)} \end{aligned} \quad (19)$$

其中

$$s_{1,2} = \frac{-e_m k_p \pm \sqrt{(e_m k_p)^2 - 4e_m k_i}}{2} \quad (20)$$

锁相环存在误差时的电气相量图<sup>[10]</sup>如图9所示。

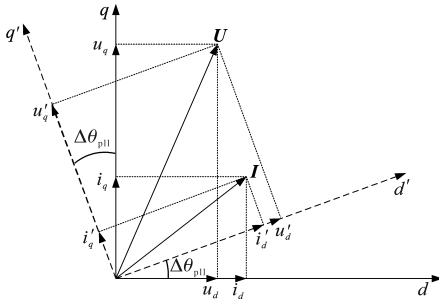


图9 锁相环存在误差时的电气相量图

Fig.9 Electrical vector diagram with error in phase-locked loop

由图9可知,当存在锁相偏差时,网侧电压 $d, q$ 轴分量变为

$$\begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\theta_{pll} & \sin\Delta\theta_{pll} \\ -\sin\Delta\theta_{pll} & \cos\Delta\theta_{pll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (21)$$

由图9和式(21)可知,并网口电压在相同的情况下,由于锁相环锁相偏差的存在,经过 Park 变换后, PMSG 跟踪到的并网口电压不是实际的并网口电压。故障发生后,当锁相差为正时,表示锁相环输出的电压相位超前于并网口电压实

际相位,由此相位经逆变器反馈控制后输出的电压相位也同样超前;当锁相差为负时,表示锁相环输出的电压相位滞后于并网口电压实际相位,由此相位经逆变器反馈控制后输出的电压相位也同样滞后。

锁相差的存在导致了经过变流器双环控制后输出的 PMSG 三相等效内电势当前值  $U_g$  的相位发生了不规则的变化,从而使并网点电压  $U_b$  和 PMSG 注入电网的电流  $I$  相位也随之变化。由于电流内环响应时间很短,响应速度快,所以在功率达到设定功率、电压相位不断超前、频率不断增大的时间里,锁相差导致的相位变化使得 PMSG 频率变化更加复杂。假设在功率达到设定功率,电压相位不断超前的时间里出现了锁相差为正(即锁相环输出的电压相位超前于并网口电压实际相位)的时候,锁相差加快了频率的增加,而当功率达到设定功率,电压相位不断超前的时间里出现了锁相差为负(即锁相环输出的电压相位滞后于并网口电压实际相位)的时候,锁相差延缓了频率的增加,进而导致频率在原有的基础上再次发生变化。

### 3 仿真验证与分析

不同的故障类型、故障持续时间、短路比都会对 PMSG 的频率特性产生影响,为分析不同因素对 PMSG 频率变化的具体影响以及验证本文所述的线路故障时 PMSG 的频率响应特性,搭建了如图10所示的基于 Matlab/Simulink 仿真平台的 PMSG 并网系统仿真模型。

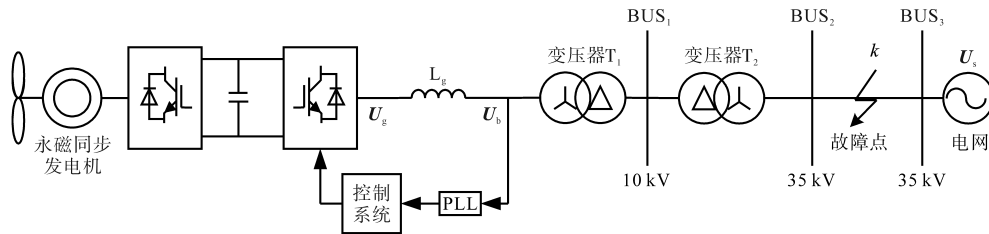


图10 PMSG 并网系统仿真结构图

Fig.10 PMSG grid-connected system simulation structure diagram

PMSG 输出经过变压器  $T_1$  升压至 10 kV,通过输电线后经过变压器  $T_2$  升压至 35 kV 与电网系统侧相连。风机经滤波后出口处为并网口,并网口电压为 380 V。PMSG 网侧逆变器以及线路的相关参数如表1所示。

在下文的仿真算例中,故障发生前 PMSG 输出的有功功率为 1.0(标么值),PMSG 网侧变流器

表1 PMSG 并网仿真模型参数

Tab.1 Parameters for PMSG grid connection simulation model

参数	数值	参数	数值
额定容量/(kV·A)	15	锁相环控制参数 $k_p$	30
电流内环控制参数 $k_{pi}$	2	锁相环控制参数 $k_i$	350
电流内环控制参数 $k_{ii}$	50	滤波电感/mH	8
电压外环控制参数 $k_{pv}$	20	滤波电容/ $\mu$ F	2.34
电压外环控制参数 $k_{iv}$	10	直流母线电容/ $\mu$ F	1 700

处于单位功率因数运行状态。根据上述PMSG低压穿越的要求,故障后电流内环的参考值直接给定为故障后 $d, q$ 轴电流设定值,且在直流侧加入撬棒电路进行稳压。

### 3.1 PMSG的频率响应特性及影响因素验证分析

如图10所示, $t=1.3$  s时在图中的 $k$ 点处设置短路故障,故障后并网点电压 $U_b$ 跌落。通过设置不同类型的短路故障,得到PMSG出口电流的频率波形。

当PMSG连接到弱系统,短路比较小, $k$ 点分别发生单相接地短路故障和三相短路故障时,PMSG的故障频率输出如图11所示。

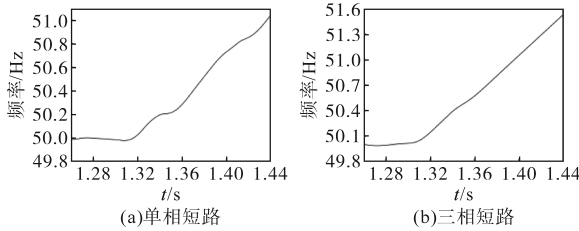


图11 不同故障类型PMSG输出频率  
Fig.11 Frequency of PMSG with different fault types

由图11可知,当PMSG连接到弱系统,短路比较小,电网发生单相接地短路时,PMSG输出电流的频率在故障持续时间内一直增大,增长速度较快,短时间内已经变化超过1 Hz,如此大的频率变化会对继电保护产生影响,会造成继电保护的不正确动作。当电网发生三相短路故障时,由于故障条件更加恶劣,在发生故障相同的时间内PMSG输出电流的频率增大更为严重,增长速度更快,短时间内变化已经超过1.6 Hz,且会在故障未切除之前一直增大,严重影响到继电保护的正确动作。

当PMSG连接到弱系统,短路比较小, $k$ 点发生三相短路故障,故障持续时间为0.2 s和0.4 s时,PMSG的故障频率输出如图12所示。

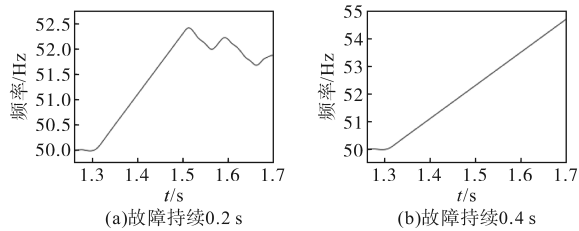


图12 不同故障持续时间PMSG频率  
Fig.12 Frequency of PMSG with different fault durations

由图12可知,当故障长时间持续未切除时,由于功率一直未达到目标值,导致电压、电流相位一直超前,频率会一直增大。故障持续时间越

长,切除得越晚,频率增长越快,对继电保护的影响越大,最后致使继电保护不能正确动作。

当系统短路比不同,即系统强度不同, $k$ 点发生三相短路故障时,PMSG的故障频率输出如图13所示。

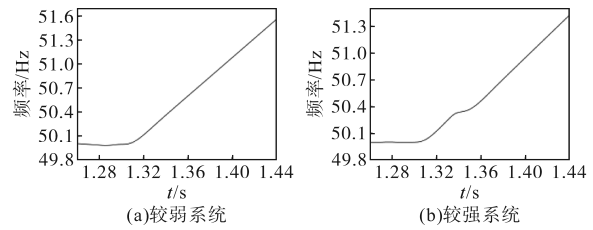


图13 不同系统强度PMSG输出频率

Fig.13 Frequency of PMSG with different system strengths

由图13可知,当系统强度较高时,系统具有更好的故障抗扰能力和恢复能力,PMSG输出频率增加较小,反之,当系统强度较低时,系统抗扰能力和恢复能力较差,PMSG输出频率增加较大。所以当PMSG连接到弱系统,系统发生故障时,PMSG输出频率会更大,对继电保护产生较大影响。

由上述仿真分析可知,受故障类型、故障持续时间、短路比等因素的影响,不同故障工况下PMSG具有不同的频率变化特性。不同的故障类型和PMSG连接系统的强弱对故障后PMSG的频率变化特性影响较大,当送出线发生严重故障或PMSG连接的系统强度较弱时,故障发生后,PMSG频率增加更快,频率变化速率更大,短时间内频率变化很大,可能影响到继电保护的正确动作。

### 3.2 锁相差对PMSG频率响应特性的影响验证分析

设 $t=1.3$  s时在如图10中 $k$ 点处发生两相短路故障,由于发生故障,并网点电压瞬间跌落,电压相位发生跳变,由于锁相环存在动态响应过程,当发生故障时,锁相环无法及时准确地检测到并网口的实际电压相位,输出的相位与实际相位之间存在偏差,出现了锁相差。锁相环输出以及锁相差分别如图14、图15所示。

由图14可知,由于锁相环的动态响应特性,锁相环不能及时跟踪实时电压相位,锁相环输出发生相位滞后。

由图15可知,故障发生后,锁相差多数处于负半轴,锁相差值为负,锁相环输出的电压相位滞后于并网点电压实际相位,由此相位经逆变器反馈控制后输出的电压相位同样滞后。

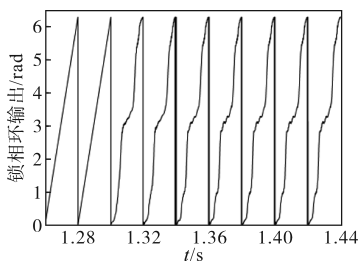


图 14 故障时 PMSG 锁相环输出

Fig.14 Phase-locked loop output of PMSG during fault

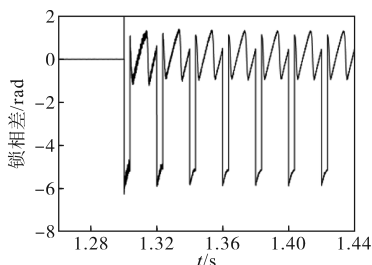


图 15 故障时 PMSG 锁相差

Fig.15 Phase-locked error of PMSG during fault

当系统发生故障,PMSG 计及锁相差和不计及锁相差时的故障频率输出如图 16 所示。

由图 16 可知,锁相差为负时,锁相差的存在延缓了频率的增加,使 PMSG 的故障频率特性更加复杂。计及锁相差的 PMSG 的故障频率同一时间下低于不计及锁相差时的故障频率。

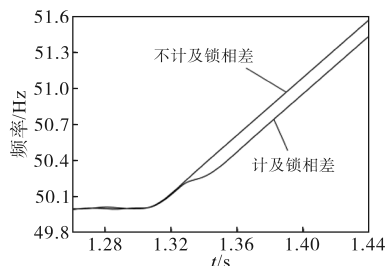


图 16 锁相差对频率特性的影响

Fig.16 Effect of phase-locked difference on frequency characteristics

根据上述分析可知,考虑锁相环动态响应过程产生锁相偏差后,控制系统检测到的并网点电压相位与实际电压相位不一致,经反馈控制后的 PMSG 当前内电势相位变化更加复杂,当前 PMSG 输出的电压和电流相位变化同样更加复杂,导致频率在原本增大的基础上再次发生变化。PMSG 频率变化特性更加复杂,对继电保护产生更为严重的影响,可能导致继电保护错误动作。

#### 4 结论

本文对故障下 PMSG 频率变化特性及其影响因素进行了分析,得到主要结论如下:

1) 由于 PMSG 网侧变流器为恒功率控制,在

线路故障期间,实际输出功率达不到设定功率目标值,需要增大功率。根据直驱风机单机无穷大系统有功功率和相角的关系可知,当功率增加时,PMSG 的三相等效内电势相位不断超前,致使并网点电压及 PMSG 注入电网的电流相位也不断超前,保护动作之前的时间内相位超前的累积等效为频率的增加。

2) 结合仿真分析可知,发生不同类型短路故障时,PMSG 实际输出功率在故障发生后减小程度不同,PMSG 内电势经过网侧变流器反馈控制后发生了不同的相位超前,进而导致相同时间内故障电流频率增加不同。故障持续时间越长,实际输出功率一直未能达到目标值,内电势相位一直超前,频率一直增加,对继电保护的影响持续扩大。线路短路比越小,电网强度越弱,在发生相同的短路故障时,故障恶劣程度越大,致使故障电流频率增加更大,影响更大。

3) 故障发生后,PMSG 三相等效内电势相位不断超前,由于锁相环锁相偏差的存在,PMSG 的三相等效内电势相位在不断超前的基础上再次发生了超前或滞后,并网点的电压和 PMSG 注入电网的电流相位也随之变化,从而导致频率在原有的基础上再次发生变化,致使频率特性更加复杂,对继电保护产生更为严重的影响。

#### 参考文献

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2023 年国民经济和社会发展统计公报[N]. 中国统计, 2024-02-29(001).  
National Bureau of Statistics. Statistical bulletin of The People's Republic of China on national economic and social development in 2023[N]. China Statist, 2024-02-29(001).
- [2] 田颖璟. 直驱风电机组接入弱电网的短路故障特性分析与暂态过电压抑制技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.  
TIAN Jinghao. Short circuit fault characteristic analysis and transient overvoltage suppression technology of PMSG connected to weak current network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [3] 王晨清, 宋国兵, 刘凯, 等. 突变保护对风电接入系统的适应性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5485-5492.  
WANG Chenqing, SONG Guobing, LIU Kai, et al. Adaptability analysis of fault component protection of power systems with wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5485-5492.
- [4] 张保会, 王进, 李光辉, 等. 风力发电机集团式接入电力系统的故障特征分析[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 176-183.  
ZHANG Baohui, WANG Jin, LI Guanghui, et al. Analysis on fault features of wind turbine generators concentratedly con-

- nected to power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(7):176-183.
- [5] 张保会,李光辉,王进,等.风电接入电力系统故障电流的影响因素分析及对继电保护的影响[J].电力自动化设备,2012,32(2):1-8.  
ZHANG Baohui, LI Guanghui, WANG Jin, et al. Affecting factors of grid-connected wind power on fault current and impact on protection relay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2):1-8.
- [6] 宋国兵,常仲学,王晨清,等.直驱风机三相短路电流特性分析[J].西安交通大学学报,2015,49(10):1-7.  
SONG Guobing, CHANG Zhongxue, WANG Chenqing, et al. Three-phase fault current characteristics of permanent magnet synchronous generator[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(10):1-7.
- [7] 栗然,高起山,刘伟.直驱永磁同步风电机组的三相短路故障特性[J].电网技术,2011,35(10):153-158.  
LI Ran, GAO Qishan, LIU Wei. Characteristics of direct-driven permanent magnet synchronous wind power generator under symmetrical three-phase short-circuit fault[J]. Power System Technology, 2011, 35(10):153-158.
- [8] 孔祥平,张哲,尹根根,等.含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J].中国电机工程学报,2013,33(34):65-74,13.  
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34):65-74, 13.
- [9] 贾科,刘浅,杨彬,等.计及锁相环动态特性的逆变电源故障暂态电流解析[J].电网技术,2021,45(11):4242-4251.  
JIA Ke, LIU Qian, YANG Bin, et al. Transient fault current analysis of the inverter-interfaced renewable energy sources considering the dynamic characteristics of the phase-locked loop[J]. Power System Technology, 2021, 45(11):4242-4251.
- [10] 盛四清,田颢璟,孙大卫,等.弱电网中直驱风机对称短路故障电流暂态特性[J].华北电力大学学报(自然科学版),2022,49(5):33-41,51.  
SHENG Siqing, TIAN Haojing, SUN Dawei, et al. Transient characteristics of symmetrical short circuit fault current of direct drive fan in weak current network[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2022, 49(5):33-41, 51.
- [11] 李东晨,沈沉,吴林林,等.考虑初始风速与机端故障稳态电压跌落程度的直驱风机故障响应特性分类及其判别方法研究[J].中国电机工程学报,2024,44(4):1247-1260.  
LI Dongsheng, SHEN Chen, WU Linlin, et al. Study on fault response characteristics classification and discriminant method of PMSG considering initial wind speed and drop degree of terminal fault steady-state voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4):1247-1260.
- [12] 欧阳金鑫,余建峰,张澳归,等.电网故障下含直驱风电机组的电力系统频率动态响应分析[J].电力系统自动化,2024,48(8):111-121.  
OUYANG Jinxin, YU Jianfeng, ZHANG Aogui, et al. Analysis of dynamic frequency response for power systems with direct-drive wind turbines under power grid fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(8):111-121.
- [13] 赵冬.直驱风机并网频率耦合的影响因素和抑制策略研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2023.  
ZHAO Dong. Study on influencing factors and suppression strategies of PMSG coupled with weak network frequency coupling[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology, 2023.
- [14] HE J F, HUANG L B, WU D, et al. Frequency support from PMSG-based wind turbines with reduced DC-link voltage fluctuations[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2018, 2(3):296-302.
- [15] 张威.基于永磁直驱风力发电机的频率调节和电压穿越[D].太原:山西大学,2023.  
ZHANG Wei. Frequency regulation and voltage ride-through based on permanent magnet direct-drive wind turbines[D]. Taiyuan:Shanxi University, 2023.
- [16] 张开明,史宏俊,郭涛.采用滑模自适应控制的永磁同步风力发电系统最大功率控制[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(7):143-150.  
ZHANG Kaiming, SHI Hongjun, GUO Tao. Maximum power control of permanent magnet synchronous wind power generation system based on sliding-mode adaptive control[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(7):143-150.
- [17] 冯子木,孙国强,滕德红,等.永磁直驱风电机组低电压穿越研究综述[J].电力工程技术,2021,40(2):75-85.  
FENG Zimu, SUN Guoqiang, TENG Dehong, et al. Reviews of LVRT technology for D-PMSG[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2):75-85.
- [18] 董文凯,杜文娟,王海风.弱连接条件下锁相环动态主导的并网直驱风电场小干扰稳定性研究[J].电工技术学报,2021,36(3):609-622.  
DONG Wenkai, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Small-signal stability of a grid-connected PMSG wind farm dominated by dynamics of PLLs under weak grid connection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3):609-622.
- [19] 张兴.新能源变流技术[M].北京:机械工业出版社,2018.  
ZHANG Xing. New energy conversion technology[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2018.
- [20] 郑涛,邹芃莹,王子鸣.计及锁相环动态响应特性的光伏并网系统故障电流解析计算[J].电网技术,2022,46(12):4656-4667.  
ZHENG Tao, ZOU Pengying, WANG Ziming. Fault current analysis of photovoltaic grid-connected system considering dynamic response characteristics of PLL[J]. Power System Technology, 2022, 46(12):4656-4667.

收稿日期:2025-02-19

修改稿日期:2025-04-22