

# 不平衡电网下永磁直驱风机LVRT策略研究

蒋洋,陈众,吴永康

(长沙理工大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**永磁直驱风机在不平衡电网下容易发生电流越限,从而影响并网系统的可靠性运行。针对这一问题,提出了一种基于直接功率控制的低压穿越控制策略。该策略采用直接功率内环对网侧逆变器进行控制,将有功率和无功率指令分解为直流分量和二倍频交流分量。以低压穿越无功支撑与逆变器电流幅值越限为前提,推导计算出有功和无功率直流分量的参考值,根据并网点电压电流将有功、无功功率二倍频交流分量按照三种不同控制目标进行计算得出其参考值,然后通过准比例谐振控制器设计出控制环路。最后基于Matlab/Simulink搭建仿真模型,仿真结果表明:所提控制策略能改善逆变器动态性能,提高并网系统在不平衡电网下的运行能力。

**关键词:**永磁直驱风机;不平衡电网;低压穿越

**中图分类号:**TM614 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd25654

## **Rsearch of Low-voltage Ride-through for Permanent Magnet Synchronous Generator Under Unbalanced Voltage Conditions**

JIANG Yang, CHEN Zhong, WU Yongkang

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

**Abstract:** The permanent magnet synchronous generator (PMSG) is prone to current overstep in unbalanced grid, which affects the reliability of grid-connected system. To solve this problem, low-voltage ride-through control strategy based on direct power control was proposed. In this strategy, the direct power inner loop was used to control the grid-side inverter, and the active power and reactive power instructions were divided into DC components and double frequency AC components. The reference values of the DC components of active power and reactive power were calculated on the premise of the low voltage traverse reactive power support and the current amplitude of the inverter. The reference values of the AC components of active power and reactive power were calculated according to three different control objectives according to the voltage and current of the junction point. Then the control loop was designed by the quasi-proportional resonant controller. Finally, a simulation model was built based on Matlab/Simulink, and the simulation results show that the proposed control strategy can improve the dynamic performance of the inverter and improve the operation ability of the grid-connected system under the unbalanced grid.

**Key words:** permanent magnet synchronous generator (PMSG); unbalanced grid; low-voltage ride-through (LVRT)

随着环境问题的严峻以及国家对于“双碳”目标的提出,加快了可再生能源的发展步伐<sup>[1-2]</sup>。永磁直驱风机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)由于控制灵活、可靠性高等优点在风电场中得到了广泛应用,在未来的能源发展中

不可或缺<sup>[3-5]</sup>。然而在实际运行中,单相短路接地、两相短路等不对称故障和电网负荷阻抗的不对称等造成的电网电压不平衡现象极其普遍。电网电压不平衡条件下,并网逆变器在正向同步旋转坐标系基于PI调节器的传统控制策略运行

**基金项目:**南方电网科研院科技项目(0002200000039389)

**作者简介:**蒋洋(2002—),男,硕士研究生,主要研究方向为新能源并网,Email:22105010931@stu.csust.edu.cn

**通讯作者:**陈众(1974—),男,博士,副教授,主要研究方向为电力系统运行与控制,Email:2459100334@qq.com

时,存在的负序分量在正序同步旋转坐标系下表现为2倍电网频率分量,会导致输出功率与输出电流出现二倍频波动,进而影响直流侧电容电压的二倍频波动,对风电系统的稳定性造成很大影响,以及引起并网输出电流的畸变<sup>[6]</sup>。因此研究电网侧不对称故障时PMSG的故障穿越控制策略具有现实意义和价值<sup>[7]</sup>。

低压穿越(low-voltage ride-through, LVRT)是当前风机的一个研究热点,国内外对网侧逆变器基于加硬件保护电路和改进控制策略的LVRT提出了多种方案<sup>[8]</sup>。硬件保护方面,文献[9]在直流侧添加了卸荷电路,将电网发生故障情况下产生的功率差额消耗在耗能电阻上,以此保证电网的正常运行,结构简单,但要额外考虑散热问题。文献[10]在直流侧卸荷电路中增加储能元件,将功率差额带来的能量储存在储能元件中,但储能元件提高了系统成本。改进控制策略方面,文献[11]提出了一种基于输出电流正弦和有功恒定的LVRT优化控制策略,可以抑制逆变器的过电流,并保持电网电压骤降期间的直流电压稳定性,但是其控制过程复杂,计算量过大,响应速度慢。文献[12]采用改变最大功率点追踪(maximum power point tracking, MPPT)运行模式来匹配PI控制的LVRT控制策略,该方法在对称故障时可以向电网输送无功支撑,但网侧逆变器输出电流谐波含量高,且电流限幅效果不明显,在不对称故障下低压穿越的情况未知。文献[13]基于基波补偿结合PI控制器实现低压穿越,能提高系统故障时响应速度,维持直流侧母线电压,但是在不对称故障时电流谐波含量高,失真严重。

针对PMSG不对称故障下的低压穿越能力,本文首先分析了并网逆变器在不平衡电网的功率传输情况,然后在平衡电网下改进传统双电流闭环矢量控制策略,将功率环代替电流环,直接以功率作为被控量来进行闭环控制,省去了参考电流矩阵逆变换计算,改善了系统的动态性能;随后在电网不平衡条件下,结合行业标准给出直流无功功率参考值,进一步推导逆变器输出最大电流幅值,在逆变器输出电流峰值前提下,计算出有功直流分量参考值,在保证无功电压支撑和逆变器输出最大电流前提下,最大程度输出有功功率;然后讨论网侧变流器三种不同优化目标,得到不同目标下交流无功功率的参考值,并结合准比例谐振控制器对正、负序有功、无功进行稳

态无差跟踪,实现低压穿越;最后通过仿真验证了所提控制策略的有效性和可行性。

## 1 不平衡电网下的功率分析

PMSG通常采用背靠背双变流器全功率并网控制,拓扑结构如图1所示,系统包括风力机、发电机、背靠背变流器、并网变压器与滤波器等<sup>[14-15]</sup>。图中, $R_g, L_g$ 为线路等效电阻、电感; $C$ 为直流母线电容; $L_f$ 和 $C_f$ 组成滤波器。

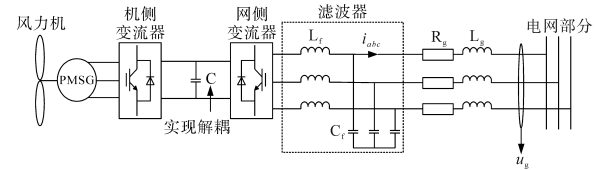


图1 直驱风机并网系统拓扑结构

Fig.1 Topological structure of grid-connected system of permanent magnet direct drive wind turbine

在不平衡电网下,PMSG采用三相无中线并网,没有零序分量,不平衡电压与不平衡电流可以运用对称分量法分解成正序分量和负序分量。根据瞬时功率理论,在两相静止坐标系下并网逆变器输出的有功功率和无功功率为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} &= \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \\ &= \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_\alpha^P + u_\alpha^N & u_\beta^P + u_\beta^N \\ u_\beta^P + u_\beta^N & u_\alpha^P + u_\alpha^N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^P + i_\alpha^N \\ i_\beta^P + i_\beta^N \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

将式(1)展开,系统功率分成直流功率和二倍频交流功率之和:

$$\begin{cases} p = P_0 + P_1 \\ q = Q_0 + Q_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_0 = \frac{3}{2} (u_\alpha^P i_\alpha^P + u_\beta^P i_\beta^P + u_\alpha^N i_\alpha^N + u_\beta^N i_\beta^N) \\ P_1 = \frac{3}{2} (u_\alpha^N i_\alpha^P + u_\beta^N i_\beta^P + u_\alpha^P i_\alpha^N + u_\beta^P i_\beta^N) \\ Q_0 = \frac{3}{2} (u_\beta^P i_\alpha^P - u_\alpha^P i_\beta^P + u_\beta^N i_\alpha^N - u_\alpha^N i_\beta^N) \\ Q_1 = \frac{3}{2} (u_\beta^N i_\alpha^P - u_\alpha^N i_\beta^P + u_\beta^P i_\alpha^N - u_\alpha^P i_\beta^N) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $p, q$ 分别为并网点瞬时有功、无功功率; $P_0, Q_0$ 分别为直流有功、无功功率分量; $P_1, Q_1$ 分别为基波二倍频有功、无功功率分量; $u_\alpha, u_\beta, i_\alpha, i_\beta$ 分别为并网点两相静止坐标系下的电压、电流; $u_\alpha^P, u_\alpha^N, u_\beta^P, u_\beta^N, i_\alpha^P, i_\alpha^N, i_\beta^P, i_\beta^N$ 分别为两相静止坐标系下电压和电流的正、负序分量。

## 2 直接功率控制数学模型

在平衡电网下,网侧变流器采用电网电压定向,在正序同步旋转坐标系下的电压方程和功率方程为

$$\begin{cases} u_{vd} = u_{gd} + \omega L_g i_q - R_g i_d - L_g \frac{di_d}{dt} \\ u_{vq} = u_{gq} - \omega L_g i_d - R_g i_q - L_g \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (u_{gd} i_d + u_{gq} i_q) = \frac{3}{2} u_{gd} i_d \\ Q = \frac{3}{2} (u_{gq} i_d - u_{gd} i_q) = -\frac{3}{2} u_{gd} i_q \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)有功和无功功率求导,结合式(4)可以得到一组新的电网同步旋转坐标系下的电压方程:

$$\begin{cases} u_{vd} = -\frac{2}{3e_m} (PR_g + L_g \frac{dP}{dt}) + e_m + \omega L_g i_q \\ u_{vq} = \frac{2}{3e_m} (QR_g + L_g \frac{dQ}{dt}) - \omega L_g i_d \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\omega$ 为同步转速; $u_{vd}, u_{vq}, i_d, i_q, u_{gd}, u_{gq}$ 分别为变流器电压、电流和电网电压的 $d, q$ 轴分量; $e_m$ 为电网电压矢量幅值; $P, Q$ 为电网输出功率。

由式(6)等式右边前半部分不难看出逆变器输出电压与功率为一阶传递函数关系,后半部分为电压扰动,表示为 $\Delta u_d = e_m + \omega L_g i_q, \Delta u_q = -\omega L_g i_d$ ,在正常情况下表现为恒定的直流量,因此可以通过给定功率参考值与系统功率之差经过PI控制器直接得到逆变器输出电压,较于传统PQ控制法省去 $d, q$ 轴电流解耦与前馈补偿过程,降低了模型复杂程度,控制框图如图2所示。

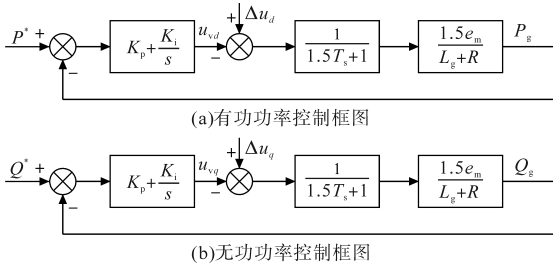


图2 直接功率控制框图

Fig.2 Block diagram of direct power control

在不对称电网电压下,由第1节可知系统会出现负序分量,系统功率会产生二倍频交流功率,采用传统PI控制器无法对交流分量进行无差调节,因此本文在PI控制器中加入2倍电网频率的准谐振控制器,对瞬时直流功率和2倍电网频

率交流功率同时进行无差控制。准比例谐振控制器的传递函数表达式为

$$G_{PR} = K_p + \frac{2K_i \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (7)$$

式中: $K_p, K_i$ 分别为比例、积分系数,控制谐振处的增益,消除稳态无差; $\omega_c$ 为截止频率,控制谐振频率处带宽; $\omega_0$ 为谐振频率,取决于控制对象,由于本文需控制2倍电网频率功率,此处取 $100\pi$ 。

## 3 交直流功率指令计算

### 3.1 直流功率指令计算

当电网发生电压跌落时,需注入一定的无功功率来保证电压恢复,根据电力行业标准,直流无功功率参考值给定如下式所示:

$$Q_0^* = \begin{cases} 0 & V_{pu} \geq 0.9 \\ S \times 1.5 \times (0.9 - V_{pu}) & 0.2 \leq V_{pu} \leq 0.9 \\ 1.05 \times S & V_{pu} \leq 0.2 \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$V_{pu} = \frac{\sqrt{U^P + U^N}}{u_b} \quad (9)$$

式中: $Q_0^*$ 为直流无功功率参考值; $S$ 为逆变器视在功率; $V_{pu}$ 为电压跌落标么值; $U^P, U^N$ 分别为两相静止坐标系下正、负序电压幅值; $u_b$ 为电压基准值。

在不对称电网下,当电压跌落过深或风机输送功率过大时,逆变器输出电流会较大,导致过流保护动作。为防止逆变器过流,有功功率指令需要重新计算。

不对称电网下,并网点电流由式(1)可得:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} i_\alpha^P \\ i_\beta^P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_\alpha^N \\ i_\beta^N \end{bmatrix} \\ &= \frac{2}{3} \frac{P_0}{u_\alpha^2 - u_\beta^2} \begin{bmatrix} u_\alpha^P - u_\alpha^N \\ u_\beta^P - u_\beta^N \end{bmatrix} + \frac{2}{3} \frac{Q_0}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{bmatrix} u_\beta \\ -u_\alpha \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

并网点电压计算如下:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha^P + u_\alpha^N \\ u_\beta^P + u_\beta^N \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_\alpha^P \\ u_\beta^P \\ u_\alpha^N \\ u_\beta^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U^P \sin(\omega t + \theta^P) \\ -U^P \cos(\omega t + \theta^P) \\ U^N \sin(\omega t + \theta^N) \\ U^N \cos(\omega t + \theta^N) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $u_a, u_b, u_c$ 为三相电压; $\theta^P, \theta^N$ 分别为正、负序电压初始相角。

为简化运算,以有功恒定为目标将式(11)代入式(10)可得电流计算如下:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} A_1 \sin(\omega t + \theta^p - \sigma_1) + A_2 \sin(\omega t + \theta^N + \sigma_2) \\ -A_1 \cos(\omega t + \theta^p - \sigma_1) + A_2 \cos(\omega t + \theta^N + \sigma_2) \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} A_1 &= \sqrt{P_0^2(1-\varepsilon^2)^{-2} + Q_0^2(1+\varepsilon^2)^{-2}} / U^P \\ A_2 &= \sqrt{P_0^2\varepsilon^2(1+\varepsilon^2)^{-2} + Q_0^2\varepsilon^2(1-\varepsilon^2)^{-2}} / U^N \\ \sigma_1 &= \arctan \frac{Q_0(1-\varepsilon^2)}{P_0(1+\varepsilon^2)} \\ \sigma_2 &= \arctan \frac{Q_0(1+\varepsilon^2)}{-P_0(1-\varepsilon^2)} \\ \varepsilon &= U^N / U^P \end{aligned}$$

式中: $\varepsilon$ 为不平衡度。

对式(12)进行反 Clark 变换得三相并网电流计算公式为

$$\begin{cases} i_a = \frac{2}{3} \sqrt{A_1^2 + A_1^2 + 2A_1A_2 \cos \theta} \times \sin(\omega t + \varphi_a) \\ i_b = \frac{2}{3} \sqrt{A_1^2 + A_1^2 + 2A_1A_2 \cos(\theta + 120^\circ)} \times \sin(\omega t + \varphi_b) \\ i_c = \frac{2}{3} \sqrt{A_1^2 + A_1^2 + 2A_1A_2 \cos(\theta - 120^\circ)} \times \sin(\omega t + \varphi_c) \end{cases} \quad (13)$$

其中

$$\begin{aligned} \theta &= \theta^p - \theta^N - \sigma_1 - \sigma_2 \quad (14) \\ \varphi_a &= \arctan \frac{A_1 \sin(\theta^p - \sigma_1) - A_2 \sin(\theta^N - \sigma_2)}{A_1 \cos(\theta^p - \sigma_1) - A_2 \cos(\theta^N - \sigma_2)} \\ \varphi_b &= \arctan \frac{A_1 \sin(\theta^p - \sigma_1 - 120^\circ) - A_2 \sin(\theta^N - \sigma_2 + 120^\circ)}{A_1 \cos(\theta^p - \sigma_1 - 120^\circ) - A_2 \cos(\theta^N - \sigma_2 + 120^\circ)} \\ \varphi_c &= \arctan \frac{A_1 \sin(\theta^p - \sigma_1 + 120^\circ) - A_2 \sin(\theta^N - \sigma_2 - 120^\circ)}{A_1 \cos(\theta^p - \sigma_1 + 120^\circ) - A_2 \cos(\theta^N - \sigma_2 - 120^\circ)} \end{aligned} \quad (15)$$

由此可得三相电流峰值计算公式如下:

$$i_{\max} = \frac{2\sqrt{P_0^2(1+\varepsilon^2)^2 + Q_0^2(1-\varepsilon^2)^2}}{3U^P(1+\varepsilon^2)(1-\varepsilon)} \quad (16)$$

由式(16)知逆变器输出最大电流受正序电压幅值、不平衡度、直流有功功率、直流无功功率影响,而正序电压幅值、不平衡度由系统本身决定,因此最大电流幅值限制需要直流有功功率、直流无功功率来进行调节。

假定逆变器最大输出电流为逆变器输出额定电流的1.1倍,为防止逆变器输出过电流,输出电流需限制在一定范围内,应满足下式:

$$i_{\max} \leq i_{\text{rated}} \quad (17)$$

式中: $i_{\text{rated}}$ 为限制电流,取逆变器输出额定电流的1.1倍。

当在不平衡电网下逆变器输出电流不满足式(17)时,此时不能将风机产生的所有有功功率注入电网,此时直流有功功率应由下式给定:

$$P_0^* = \sqrt{\frac{[ \frac{3U^P(1+\varepsilon^2)(1-\varepsilon)}{2} \times 1.1i_n ]^2 - Q_0^{*2}(1-\varepsilon^2)^2}{(1+\varepsilon^2)^2}} \quad (18)$$

式中: $i_n$ 为逆变器输出额定电流。

### 3.2 交流功率指令计算

不平衡电网下交流功率指令计算可由式(3)得到。为适应不平衡电网下不同运行要求,实现不同的控制目标<sup>[6]</sup>,本文根据不同要求建立不同的网侧逆变器控制策略,其交流功率指定计算如下:

1)目标1:抑制有功功率的二次波动,即当需要维持变流器有功功率恒定时,将 $P_1^* = P_1 = 0$ 代入式(3)得到逆变器输出有功功率恒定时功率内环交流给定信号为

$$\begin{cases} P_1^* = 0 \\ Q_1^* = \frac{3}{2} (u_\beta^N i_\alpha^P - u_\alpha^N i_\beta^P + u_\beta^P i_\alpha^N - u_\alpha^P i_\beta^N) \end{cases} \quad (19)$$

2)目标2:抑制网侧无功功率的二次波动,即当需要维持变流器无功功率恒定时,将 $Q_1^* = Q_1 = 0$ 代入式(3)得到逆变器输出无功功率恒定时功率内环交流给定信号:

$$\begin{cases} P_1^* = \frac{3}{2} (u_\alpha^N i_\alpha^P + u_\beta^N i_\beta^P + u_\alpha^P i_\alpha^N + u_\beta^P i_\beta^N) \\ Q_1^* = 0 \end{cases} \quad (20)$$

3)目标3:抑制网侧电流的负序分量,即维持变流器输出电流三相对称,将 $i_\alpha^N = 0, i_\beta^N = 0$ 代入式(3)得到逆变器有功功率恒定时功率内环交流给定信号:

$$\begin{cases} P_1^* = \frac{3}{2} (u_\alpha^N i_\alpha + u_\beta^N i_\beta) \\ Q_1^* = \frac{3}{2} (u_\beta^N i_\alpha - u_\alpha^N i_\beta) \end{cases} \quad (21)$$

综上易知,为了实现不同控制目标,将直流与交流指令叠加在一起并结合直流母线电压外环控制的系统控制策略框图如图3所示。

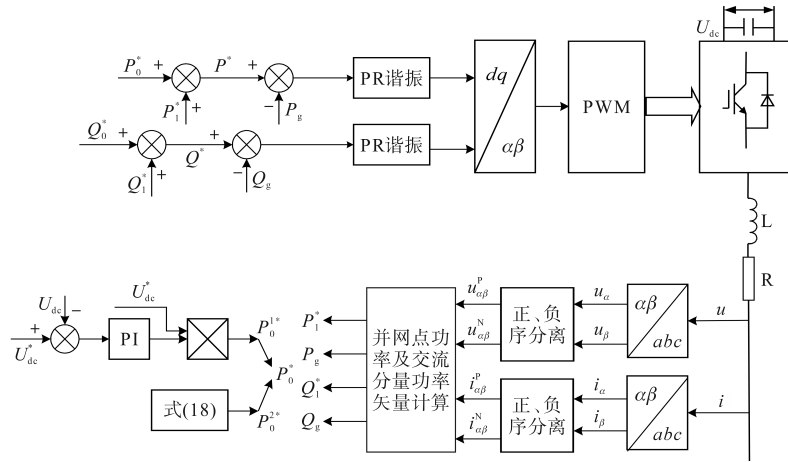


图3 网侧变流器在不平衡电网下采用直接功率控制的系统框图

Fig.3 System block diagram of direct power control for the side converter in unbalanced power network

### 4 直流侧能量卸荷电路

当逆变器输出电流限额时,系统仍工作在MPPT模式<sup>[17]</sup>,由于逆变器的过流保护<sup>[18]</sup>,使得机侧输出功率与网侧输出功率不平衡,功率差额集中在直流侧电容两端,导致电容电压急剧增加,增加到一定值时引起电容器过电压,影响系统的稳定,所以在直流侧电容需加装卸荷电路。

卸荷电路环节组成相对简单,由卸荷电阻和可控开关器件IGBT组成,用滞环比较器控制IGBT的开关。卸荷电阻由发生故障时机侧网侧功率之差以及直流侧承受的最大电压来决定,将多余功率以热能的形式消耗掉。在故障跌落时,将电压给定值与电压实际值的差值送入滞环比较器,用于驱动IGBT。当电压给定值大于实际值,IGBT关闭,逆变器正常运行;当电压给定值小于实际值,IGBT导通消耗多余功率,以保持直流侧电容电压稳定。

### 5 仿真研究

基于本文所提的不对称故障的网侧逆变器低压穿越控制策略,在Matlab/Simulink中搭建PMSG并网系统仿真低压穿越模型。为体现所提策略的可行性与优越性,搭建了基于PQ控制策略的三种控制目标策略作对照。其相关参数如下:额定容量 $S_B=21\text{ kV}\cdot\text{A}$ ,直流母线电压 $U_{dc}=0.8\text{ kV}$ ,滤波电容 $C_f=20\text{ }\mu\text{F}$ ,滤波电感 $L_f=0.013\text{ H}$ ,电网频率 $f=50\text{ Hz}$ ,并网点电压 $U=380\text{ V}$ 。

#### 5.1 对称故障低压穿越

设置ABC三相对称跌落50%,仿真分析基于所提控制策略与PQ控制策略。图4为对称故障

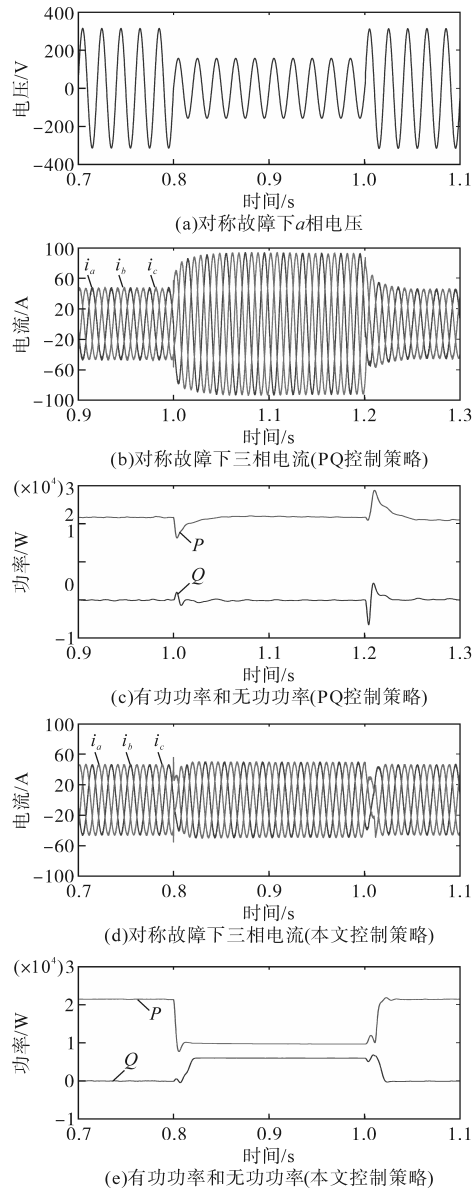


图4 对称故障仿真波形

Fig.4 Simulation waveforms under symmetric fault

仿真波形。图4b、图4c为PQ控制策略发生对称故障仿真波形;图4d、图4e为所提控制策略对称故障仿真波形。图中, $i_a, i_b, i_c$ 为网侧变流器输出三相电流; $P, Q$ 分别为并网点输出有功和无功功率。由图4可知,本文所述故障穿越策略,相较于PQ控制策略,逆变器输出电流幅值为最大限幅(56.2 A),且实时根据上位机的需求向电网输入无功功率来帮助电网的恢复,输出电流在过电流保护范围内尽最可能向电网输入有功。而PQ控制策略在电网故障下有明显的电流越限情况,且无法向电网输送无功来支撑电网电压恢复,严重时可能导致电网发生更大的危害。因此,所述控制策略能良好地实现低压穿越。

### 5.2 不对称故障低压穿越

基于本文所提控制策略设置故障时间间隔0.2 s, A, B两相电压跌落50%, C相保持不变,不平衡度为0.47。基于PQ控制设置A, B两相电压跌落35%,不平衡度为0.34。仿真分析基于两种控制策略,分别采用三种不平衡控制目标的仿真结果如图5~图10所示。

由图5~图7可知,在电网不平衡条件下,采用PQ控制策略时,其控制输出额定有功功率,输出电流峰值明显超出逆变器允许输出最大电流峰值,且对于电网电压恢复没有无功支撑作用,经过低压穿越后波形也有一定的振荡。

由图8~图10可知,本文所提控制策略在两相静止坐标系下能有效控制正、负序有功、无功,使其反馈能无差跟踪给定值,实现不同控制目标。其中,图8中有功二倍频基本被消除,三相输出电流波形正弦度较好,且故障后的电流在过流保护范围内;图9有效消除了无功二倍频分量,三相输出电流波形正弦度较好,但有功存在二倍频波动;图10中变流器输出电流三相对称,但有功无功均存在二倍频波动。现象均与理论一致。

由此可知,本文所提控制策略较于PQ控制策略具有良好的功率跟踪效果,既能限制逆变器输出电流,又能对电网起到无功支撑作用,且动态响应快,功率波动小,能在电网恢复时快速到达稳态,证明了该控制策略良好的鲁棒性。

基于本文所提控制策略,在限制电流峰值时,在电网不对称故障下,直流有功和无功功率参考值需要切换,会导致电流的幅值上升,之后慢慢下降。本文基于文献[16]合理设置参数,较好地抑制了这种情况。

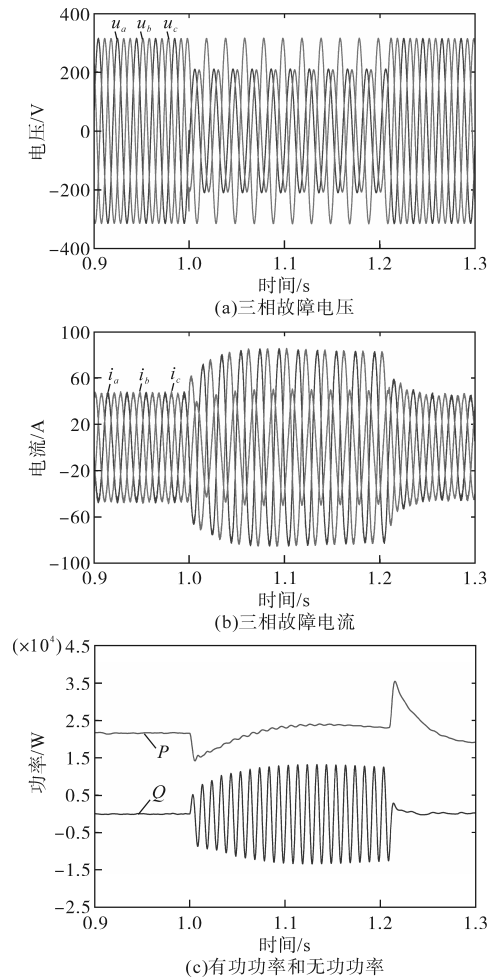


图5 PQ控制有功恒定仿真波形

Fig.5 Simulation waveforms of constant active power under PQ control strategy

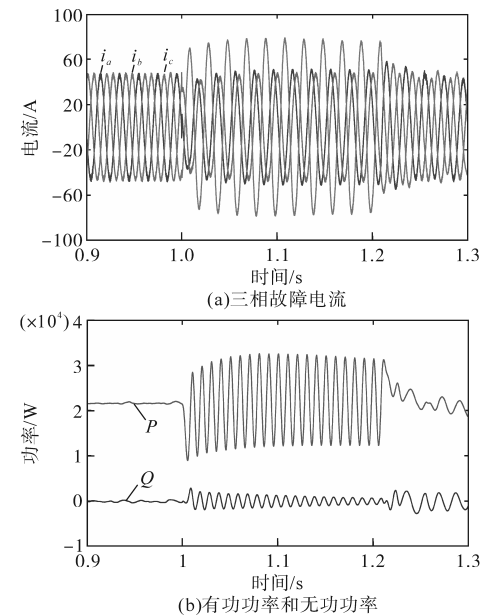


图6 PQ控制无功恒定仿真波形

Fig.6 Simulation waveforms of constant reactive power under PQ control strategy

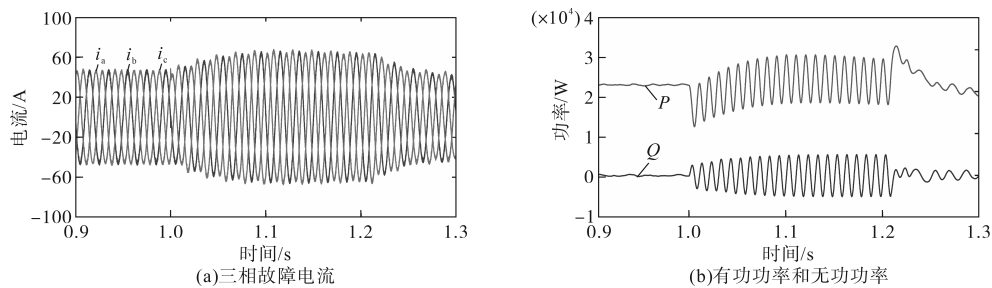


图7 PQ控制电流三相对称仿真波形

Fig.7 Simulation waveforms of three-phase current symmetry under PQ control strategy

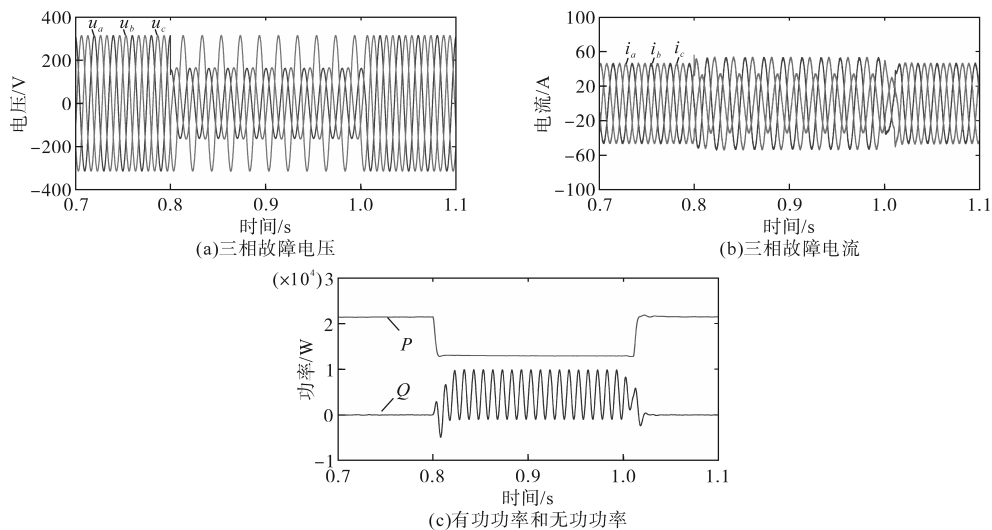


图8 基于直接功率控制有功恒定仿真波形

Fig.8 Simulation waveform based on direct power control active power constant

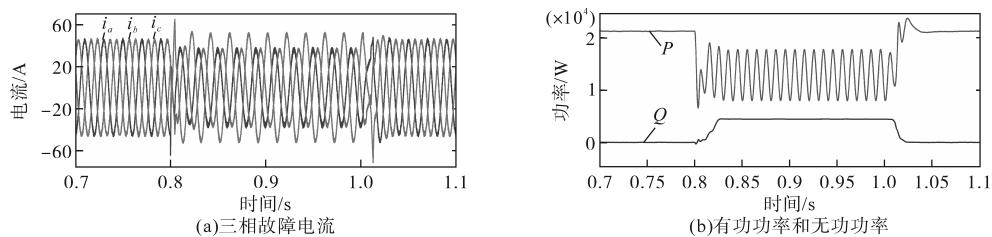


图9 基于直接功率控制无功恒定仿真波形

Fig.9 Simulation waveforms based on direct power control with constant reactive power

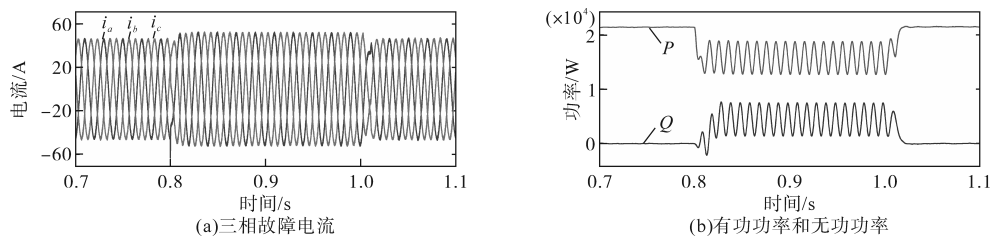


图10 基于直接功率控制三相电流对称仿真波形

Fig.10 Simulation waveform of three-phase current symmetry based on direct power control

## 6 结论

文章针对风电系统低压穿越中电流超限以及无功支撑问题,提出了一种网侧逆变器控制策略,结论如下:

1) 电网电压跌落严重或大容量风机在故障

电网情况下极容易发生电流超限问题,按所提控制策略能很好控制电流超限,可避免发生逆变器损坏,并可向电网输送无功功率帮助电压恢复。

2) 所提直接功率控制策略减少了参考电流的矩阵计算,直接以功率作为研究对象,减少大量三角函数计算,节约了成本,提高了并网逆变

器在不平衡电网下的运行能力。

#### 参考文献

- [1] 文云峰,杨伟峰,汪荣华,等. 构建100%可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1843-1856.  
WEN Yufeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, et al. Review and prospect of toward 100% renewable energy power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1843-1856.
- [2] 姜海洋,杜尔顺,金晨,等. 高比例清洁能源并网的跨国互联电力系统多时间尺度储能容量优化规划[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2101-2115.  
JIANG Haiyang, DU Ershun, JIN Chen, et al. Optimal planning of multi-time scale energy storage capacity of cross-national intercon-nected power system with high proportion of clean energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2101-2115.
- [3] JOSHI J, SWAMI A K, JATELY V, et al. A comprehensive review of control strategies to overcome challenges during LVRT in PV systems[J]. IEEE Access, 2021, 9: 121804-121834.
- [4] 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): 33-47.  
YAO Gang, YANG Haomeng, ZHOU Lidian, et al. Development status and key technologies of large-capacity offshore wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 33-47.
- [5] 高晨,赵勇,汪德良,等. 海上风电机组电气设备状态检修技术研究现状与展望[J]. 电工技术学报, 2022, 37(S1): 30-42.  
GAO Chen, ZHAO Yong, WANG Deliang, et al. Research status and prospect of condition based maintenance technology for offshore wind turbine electrical equipment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(S1): 30-42.
- [6] 余万荣,丁宇洁,李欢,等. 不平衡电网下储能系统直流纹波分析及抑制策略[J]. 电气传动, 2021, 51(5): 31-37.  
YU Wanrong, DING Yujie, LI Huan, et al. DC-side low frequency ripple analysis and active suppression strategy of energy storage inverter under unbalanced grid[J]. Electric Drive, 2021, 51(5): 31-37.
- [7] 刘军,赵晨聪,谢宙桦,等. 电网不平衡故障下风电并网逆变器的控制综述[J]. 电气传动, 2020, 50(8): 65-73.  
LIU Jun, ZHAO Chencong, XIE Zhouhua, et al. An overview on control of wind power grid-connected inverter under unbalanced grid faulty[J]. Electric Drive, 2020, 50(8): 65-73.
- [8] NITHYA C, ROSELYN J P. Multimode inverter control strategy for LVRT and HVRT capability enhancement in grid connected solar PV system[J]. IEEE Access, 2022, 10: 54899-54911.
- [9] 朱东海,邹旭东,胡家兵,等. 双馈风电机组无撬棒故障穿越技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(19): 4895-4910.  
ZHU Donghai, ZOU Xudong, HU Jiabing, et al. Review of crowbarless fault ride through technology for doubly-fed induction generator-based wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(19): 4895-4910.
- [10] 王鹏,王晗,张建文,等. 超级电容储能系统在风电系统低电压穿越中的设计及应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1528-1537.  
WANG Peng, WANG Han, ZHANG Jianwen, et al. Design and application of supercapacitor energy storage system used in low voltage ride through of wind power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1528-1537.
- [11] 武承杰,付超,范士雄. 基于模块化多电平换流器的光伏并网系统低电压穿越技术控制策略[J]. 电力建设, 2018, 39(7): 48-56.  
WU Chengjie, FU Chao, FAN Shixiong. Low voltage ride-through technology control strategy for photovoltaic grid-connected systems based on modular multilevel converters[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(7): 48-56.
- [12] 解吉蕾,杨秀,王巨波. 基于MPPT运行模式的光伏发电系统低电压穿越无功控制策略[J]. 太阳能学报, 2019, 40(12): 3426-3434.  
XIE Jiqiang, YANG Xiu, WANG Jubo, et al. A reactive power control strategy in low-voltage ride-through of photovoltaic generation system based on MPPT model[J]. Acta Energetica Sinica, 2019, 40(12): 3426-3434.
- [13] BONEYA H G, LI W, CHAO P, et al. A comprehensive LVRT strategy of two-stage photovoltaic systems under balanced and unbalanced faults[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2018, 103(12): 288-301.
- [14] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [15] CESPEDES Mauricio, SUN Jian. Modeling and mitigation of harmonic resonance between wind turbines and the grid[C]// 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2011.
- [16] 万子镜,田震,王伟,等. 基于平滑切换的不平衡工况下直驱风机故障穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(19): 138-146.  
WAN Zijing, TIAN Zhen, WANG Wei, et al. Smooth switching based fault ride-through control strategy for direct-driven wind turbine underunbalance condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 138-146.
- [17] AFSHARI E, MORADI G R, RAHIMI R, et al. Control strategy for three-phase grid-connected PV inverters enabling current limitation under unbalanced faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11): 8908-8918.
- [18] GARNICA M, DE VICUNA L G, MIRET J, et al. Optimal voltage-support control for distributed generation inverters in RL grid-faulty networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(10): 8405-8415.

收稿日期:2024-02-20

修改稿日期:2024-04-03