

# 不对称电网故障下直驱式风电机组并网控制仿真分析

梅雪峰

(盐城供电公司电力调度控制中心, 江苏 盐城 224001)

**摘 要:** 分析了直驱式风力发电机组(Directly Driven Wind Turbines)在电网不对称故障下的瞬态特性, 在此基础上为提高其低电压穿越(LVRT, Low Voltage Ride Through)能力, 采用对称分量法, 将电网电压负序分量引入网侧变流器的参考功率计算中, 提出适应电网不对称故障的预测电流控制策略。仿真结果表明, 该控制策略能有效地抑制电网不对称故障条件下直驱式风电机组直流母线电压波动、防止直流过电压, 并减少对电网的谐波馈送, 保持输出三相功率平衡, 实现了风电机组的不对称故障穿越。

**关键词:** 直驱式风电机组; 不对称故障; 对称分量法; 预测电流控制

## 0 引言

近几年在国家新能源政策的扶持下, 风力发电发展迅速, 风电装机容量在电网中所占的比例越来越高, 对电网安全稳定性的影响越发凸显, 低电压穿越问题是其中一个研究热点<sup>[1]</sup>。

研究表明当风电的电网穿透功率超过 5%<sup>[2]</sup>, 如果在电网故障时风电机组从电网中切除, 将会因为瞬时功率的大量缺失对电力系统的稳定性造成影响, 严重情况下可能引起电压、频率崩溃, 危及电网安全。新的风电并网政策要求风电机组具有低电压穿越能力, 即在电网故障期间, 电网电压跌落情况下风电机组保持并网运行, 并适当提供无功以支持电网电压的恢复, 提高系统稳定性。

直驱式风力发电机组省去了笨重且故障率较高的齿轮箱部件, 具有结构简单、维护成本低、转换效率高、可靠性高等优点在风电市场中正得到越来越广泛的应用。直驱式风电机组通过全功率变流器将发电机与电网完全隔离, 因而本身就具有较好的低电压穿越能力<sup>[3-4]</sup>。在电网故障期间, 由于电网电压跌落, 网侧逆变器输出功率减小, 而机侧整流器的输入功率不变, 必然导致直流母线过电压、变流器过电流。针对这种情况, 风电机组一般采用了附加 CrowBar 或储能装置, 为不平衡功率提供了泄放途径, 有效地提高了风电机组的低电压穿越能力。

目前的研究大多是针对电网三相对称故障<sup>[1]</sup>, 然而实际运行中, 电网发生不对称故障的可能性更高, 如单相接地、两相短路、两相接地等, 此时电网电压是不平衡的。当电网发生不对称故障时, 传

统基于三相平衡的控制策略, 往往不能有效地抑制网侧变流器负序电流分量和直流母线的电压波动。一些文献<sup>[5-6]</sup>提出在网侧加装交流带通滤波器的方法, 起到一定的效果, 但无疑也增加了硬件成本。

本文分析了三相不平衡电网电压对直驱式风电机组的影响, 在此基础上采用对称分量法, 将无需复杂参数设计的预测电流控制算法应用于机组变流器控制, 并通过仿真模型验证上述控制策略的有效性和准确性。

## 1 不对称电网故障下直驱风电机组瞬态特性

### 1.1 不对称电网电压下网侧变流器模型

如图 1, 直驱式风电机组中变流器传递全部功率, 发电机与电网被中间直流环节分隔, 机侧和网侧变流器可独立控制, 最大程度把电网故障的影响限制在网侧。

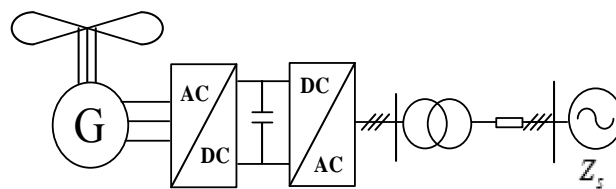


图 1 直驱式风电机组结构

三相 PWM 变流器的等效电路如图 2, 由此可建立三相静止对称坐标系下的数学方程<sup>[7][10]</sup>:

$$\begin{cases} e_a - L di_a / dt - Ri_a - s_1 u_{dc} = u_{NO} \\ e_b - L di_b / dt - Ri_b - s_2 u_{dc} = u_{NO} \\ e_c - L di_c / dt - Ri_c - s_3 u_{dc} = u_{NO} \\ C du_{dc} / dt = i_a s_1 + i_b s_2 + i_c s_3 - (u_{dc} - e_L) / R_L \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $s_k$  为单极性二值逻辑开关函数;  $i_L$  为直流侧负载电流;  $R$ 、 $L$  为滤波电感参数; 考虑到对三相对称系统有  $e_a + e_b + e_c = 0$  且  $i_a + i_b + i_c = 0$ , 则  $u_{NO} = -u_{dc} / 3(s_1 + s_2 + s_3)$ , 通常为了对变流器进行解耦控制, 需经 *park* 变换将此方程变换到两相旋转坐标系( $d, q$ )中, 即:

$$\begin{cases} L di_d / dt = e_d - Ri_d + \omega Li_q - s_d U_{dc} \\ L di_q / dt = e_q - Ri_q + \omega Li_d - s_q U_{dc} \\ C du_{dc} / dt = 3 / 2 (i_d s_d + i_q s_q) - i_L \end{cases} \quad (2)$$

式中  $s_d, s_q$  为( $d, q$ )坐标系下的开关函数, 它既包含直流分量, 也含有部分高频分量。

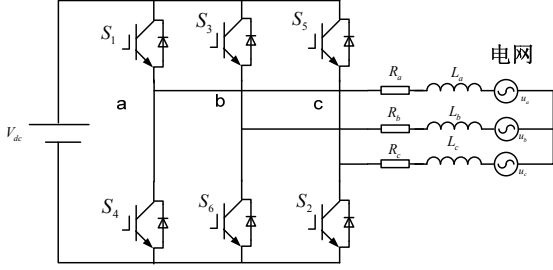


图2 网侧 PWM 变流器等效电路

在电网不对称故障时, 可将电网电压与电流矢量运用对称分量法进行分解, 并经 *park* 变换到正负序同步旋转坐标系下, 可得到网侧变流器在正序负序旋转坐标系下的数学模型<sup>[7-8]</sup>:

$$\begin{cases} L di_d^p / dt = e_d^p - u_d^p - Ri_d^p + \omega Li_q^p \\ L di_q^p / dt = e_q^p - u_q^p - Ri_q^p - \omega Li_d^p \\ L di_d^n / dt = e_d^n - u_d^n - Ri_d^n - \omega Li_q^n \\ L di_q^n / dt = e_q^n - u_q^n - Ri_q^n + \omega Li_d^n \end{cases} \quad (3)$$

## 1.2 电网不对称故障对网侧变流器的影响

当系统三相电压不对称时, 可通过对称分量法分解为三相对称的正、负及零序分量, 即电网电压可表示为:

$$\begin{pmatrix} e_a(t) \\ e_b(t) \\ e_c(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{2} E_{aRms} \sin(\omega t + \theta_a) \\ \sqrt{2} E_{bRms} \sin(\omega t + \theta_b) \\ \sqrt{2} E_{cRms} \sin(\omega t + \theta_c) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_a^p(t) + e_a^n(t) + e_a^0(t) \\ e_b^p(t) + e_b^n(t) + e_b^0(t) \\ e_c^p(t) + e_c^n(t) + e_c^0(t) \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中  $E_{iRms}$  和  $\theta_i$  分别表示各相电网电压的峰值与初始相位( $x=a, b, c$ ), 电压三相不对称时, 幅值与相位均可以不同, 但角速度是相同的, 因电网频率是

恒定的。一般直驱式风力发电系统变流器采用三相三线制无中线接线, 零序电动势没有通路, 因此不需要考虑零序电压分量。将式(4)变换到两相旋转坐标系下则有:

$$\begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} = C_{2/3} R(\theta) \begin{pmatrix} e_d^p \\ e_q^p \end{pmatrix} + C_{2/3} R(-\theta) \begin{pmatrix} e_d^n \\ e_q^n \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中  $C_{2/3}$  为两相静止坐标到三相静止坐标的变换矩阵;  $R(\theta)$  为两相静止坐标系到两相正序旋转坐标系的变换矩阵,  $R(-\theta)$  为两相静止坐标到两相负序旋转坐标系的变换矩阵。

由此可得出三相不平衡电动势在两相同步旋转坐标系( $d, q$ )下的表达式为:

$$\begin{pmatrix} e_d \\ e_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_d^p \\ e_q^p \end{pmatrix} + R(-2\omega t) \begin{pmatrix} e_d^n \\ e_q^n \end{pmatrix} \quad (6)$$

可以看出在正序同步旋转坐标系下, 原三相静止坐标系中的正序交流电压变换为直流电压, 而负序交流电压变换为二次谐波分量。

在网侧不对称电压的作用下, 网侧变流器的电流表示为:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} &= \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ C_{2/3} R(n\theta) \begin{bmatrix} i_d^p(n) \\ i_q^p(n) \end{bmatrix} + C_{2/3} R(-n\theta) \begin{bmatrix} i_d^n(n) \\ i_q^n(n) \end{bmatrix} \right\} \\ &= \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq 0}}^{\infty} \left\{ C_{2/3} R(n\theta) \begin{bmatrix} e_d(n) \\ e_q(n) \end{bmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

而网侧变流器输出直流电流的时域表达式为:

$$i_{dc}(t) = E^T I / u_{dc} \quad (8)$$

若不计算网侧变流器的损耗, 根据变流器交流侧与直流侧功率平衡的原理, 可得:

$$i_{dc}(t) = \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq 0}}^{\infty} \sum_{\substack{m=-\infty \\ m \neq 0}}^{\infty} 3 / 2 u_{dc} \begin{bmatrix} e_d(n) \\ e_q(n) \end{bmatrix}^T R[(m-n)\theta] \begin{bmatrix} i_d(n) \\ i_q(n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

由上式的分析可知<sup>[5][9]</sup>, 当电网不对称故障时, 网侧基波电压可使变流器直流侧产生 2 次谐波分量, 而直流侧 2 次谐波经变流器后在网侧产生 3 次谐波, 如此相互作用, 如果考虑高次纹波, 则变流器直流侧将含有大量偶次谐波, 而电网侧存在大量奇次谐波。电网不对称故障下, 风电机组谐波的注

入不仅影响了电网的电能质量, 还有可能引起保护误动; 同时谐波分量使直流母线电压大幅波动, 造成直流支撑电容频繁充放电, 大大缩减了直流电容器的作用寿命。

## 2 不对称电网电压下变流器的控制

### 2.1 基于预测电流的变流器控制策略

预测电流控制(PCFF, Predicted Current Control with Fixed Switching Frequency)基于两相静止坐标系( $\alpha, \beta$ )在一个开关周期内使实际电流跟踪给定值, 动态响应迅速, 功率因数可调节, 输出电压稳定。由于这种算法的内环控制无需经过比例积分调节, 因而实现起来较简单<sup>[11][12]</sup>。

根据三相 PWM 变流器的拓扑结构(图 2), 设  $U, E, I$  分别为变流器输入端空间电压矢量、三相电网电压和电流的矢量。为了简化分析可不计网侧电阻, 设当前开关周期的电流期望矢量  $I^*(t_n)$ , 则当前周期的空间电压合成矢量期望值应满足:

$$\begin{cases} U^* = E - L_s \Delta I / T_s \\ \Delta I = I(t_n + T_s) - I(t_n) = I^*(t_n) - I(t_n) \end{cases} \quad (10)$$

在控制环节中如果要保证逆变器运行在单位功率因数下, 即无功电流为 0, 则需要控制电流  $I^*(t_n)$  与电网电压  $E$  同方向或反方向, 各矢量在( $\alpha, \beta$ )坐标系下如图 3。

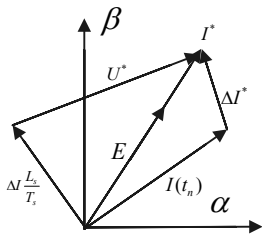


图 3 单位功率因数下三相变流器矢量关系图

其中  $I$  为实际采样电流的矢量, 根据上图可求出期望的空间电压矢量  $U^*$  在( $\alpha, \beta$ )坐标系下的分量:

$$I_m^* = (K_p + K_i / s)(U_{dc}^* - U_{dc}) \quad (11)$$

由上述分析可得 PWM 变流器预测电流控制的结构框图:

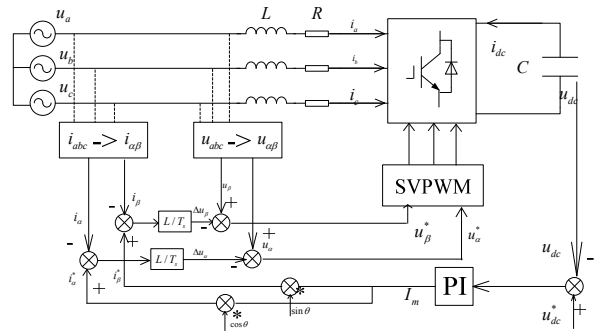


图 4 PWM 变流器预测电流控制框图

### 2.2 不对称电网电压下的预测电流控制策略

不对称电网电压下, 交流侧三相有功与无功可表示为:

$$\begin{cases} p(t) = p_0 + p_{c2} \cos(2\omega t) + p_{s2} \sin(2\omega t) \\ q(t) = q_0 + q_{c2} \cos(2\omega t) + q_{s2} \sin(2\omega t) \end{cases} \quad (12)$$

以  $p_{c2}, p_{s2}, p_{c2}, p_{s2}$  表示两倍频的有功与无功正弦和余弦值、 $p_0, q_0$  为有功与无功的平均值, 在两相旋转坐标系下公式(12)展开为:

$$\begin{cases} p_0 = 3/2(e_d^p i_d^p + e_q^p i_q^p + e_d^n i_d^n + e_q^n i_q^n) \\ p_{c2} = 3/2(e_d^p i_d^n + e_q^p i_q^n + e_d^n i_d^p + e_q^n i_q^p) \\ p_{s2} = 3/2(e_q^p i_d^p - e_d^p i_q^p - e_q^n i_d^n + e_d^n i_q^n) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} q_0 = 3/2(e_q^p i_d^p - e_d^p i_q^p + e_q^n i_d^n - e_d^n i_q^n) \\ q_{c2} = 3/2(e_q^p i_d^n - e_d^p i_q^n + e_q^n i_d^p - e_d^n i_q^p) \\ q_{s2} = 3/2(e_d^p i_d^n + e_q^p i_q^n - e_d^n i_d^p - e_q^n i_q^p) \end{cases} \quad (14)$$

若  $p_0^*, q_0^*, p_{s2}^*, p_{c2}^*$  为控制系统有功与无功给定值, 则为了消除直流侧二次谐波的影响,  $p_{s2}^*, p_{c2}^*$  需给定为零, 同时在正负序网络同步旋转坐标系中分别将  $d^p, d^q$  坐标轴定向与各自电压矢量方向, 则有:

$e_d^p = E_m^p, e_q^p = 0, e_d^n = E_m^n, e_q^n = 0$  ( $E_m^p, E_m^n$  为正负序电压幅值), 由公式(13)(14)可得控制系统电流给定值<sup>[9][13]</sup>:

$$\begin{bmatrix} i_d^{p*} \\ i_q^{p*} \\ i_d^{n*} \\ i_q^{n*} \end{bmatrix} = \frac{2}{3D} \begin{bmatrix} E_m^p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -E_m^p \\ -E_m^n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_m^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0^* \\ 0 \\ 0 \\ q_0^* \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中:  $D = [(e_d^p)^2 + (e_q^p)^2] + [(e_d^n)^2 + (e_q^n)^2] = (E_m^p)^2 + (E_m^n)^2$

将上式同步旋转坐标系( $d, q$ )下电流给定值变换到两相静止坐标系( $\alpha, \beta$ )下, 将正负序合成电流:

$$\begin{cases} i_\alpha^* = i_\alpha^{p*} + i_\alpha^{n*} \\ i_\beta^* = i_\beta^{p*} + i_\beta^{n*} \end{cases} \quad (16)$$

作为传统预测电流控制算法的给定电流, 控制框图如图 5。

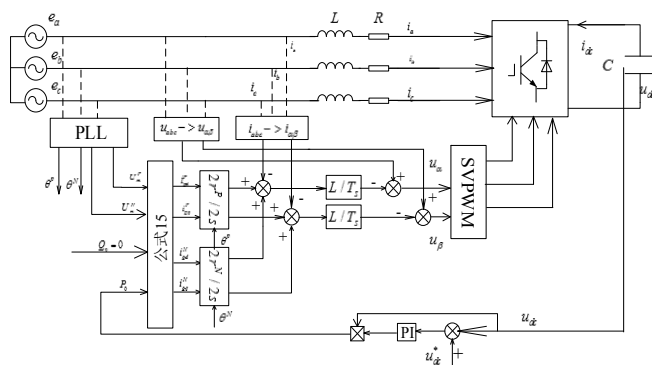


图 5 不对称电网电压下预测电流控制

### 3 仿真分析

本文采用 Matlab/Simulink 工具箱, 建立了背靠背双 PWM 型直驱式风电机组仿真模型, 主要参数见表 1。

表 1 仿真模型主要参数

额定功率/MW	1.5
网侧线电压/V	690
直流母线电压/V	1200
直流滤波电容/mF	25
电网侧滤波电感/mH	0.7
内侧进线电阻/ $\Omega$	0.003
Crowbar 电路耗能电阻/ $\Omega$	2
开关频率/kHz	2

仿真条件为机组额定功率运行时, 0.02s 电网发生 A 相接地故障, 电压跌落 50%。此时基于三相对称的控制算法, 其仿真波形如图 6、7, 而采用不对称电压下的预测电流控制算法, 仿真波形如图 8、9。

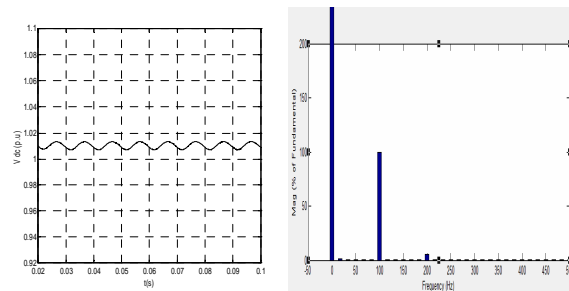


图 6 传统控制策略下直流侧电压波形及频谱

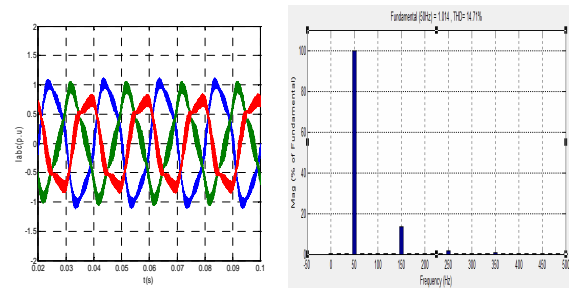


图 7 传统控制策略下网侧电流波形及频谱

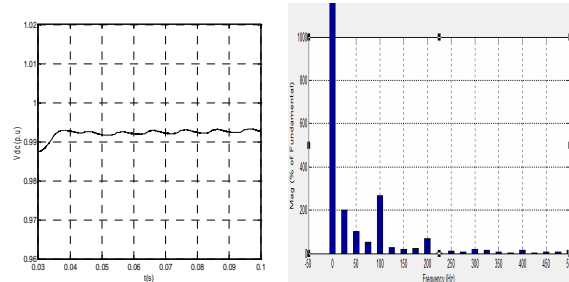


图 8 改进控制策略下直流侧电压波形及其频谱

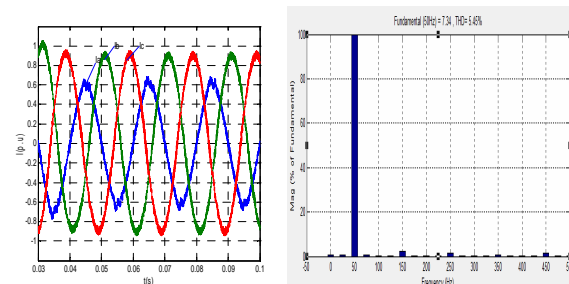


图 9 改进控制策略下网侧电流波形及其频谱

仿真结果表明, 在同等不对称电网故障下, 采用改进的预测电流控制策略, 结合直流侧 CrowBar 能量泄放回路, 可以有效地抑制机组变流器直流侧电压二次纹波, 同时网侧三相输出功率趋于平衡, 三相电流基本保持正弦, 有效地提高了直驱式风力发电机组不对称故障下的低电压穿越能力。

### 4 结束语

本文分析了电网不对称故障对直驱式风电机组的影响, 指出传统基于三相对称的控制策略存在的缺陷; 在此基础上运用对称分量法, 将故障情况下

电网负序电压分量引入网侧变流器的控制算法中, 给出不对称电网电压下基于预测电流的控制算法, 该方法仅有一个电压 PI 控制环节, 具有控制参数少, 调整简单, 便于硬件实现的优点。

#### 参考文献:

- [1] 李建林. 风力发电系统低电压运行技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 1-2.
- [2] 国家电网公司. 国家电网调(2010)201 号 附件 1 风电并网运行控制技术规定[Z], 2010 :1-2.
- [3] 胡书举, 李建林, 许洪华. 直驱式 VSCF 风电系统直流侧 Crowbar 电路的仿真分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008(3), 118-123.
- [4] 肖磊. 直驱型永磁同步风力发电系统低电压穿越技术研究[D]. 长沙: 湖南大学电气工程学院. 2009.
- [5] 徐嘉鹏, 汤钰鹏. 电网不平衡时的三相 PWM 整流器控制策略[J]. 通信电源技术, 2007, 24(3):56-63.
- [6] K. Park, S.Ahn, D.Hyun, S.Choe. Control Scheme for 3-phase PWM AC/DC Converter Considering Unbalanced input Voltage[C]. The 25<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE on Industrial Electronics Society, 1999. 1:496-501.
- [7] 李建林, 许洪华. 风力发电中的电力电子变流技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [8] 瞿兴鸿, 廖勇, 姚骏, 等. 永磁同步直驱风力发电系统的并网变流器设计[J]. 电力电子技术, 2008, 42(3): 22-24.
- [9] 何鸣明, 贺益康, 潘再平. 不对称电网故障下 PWM 整流器的控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 9(4):13-17.
- [10] 付勋波, 郭金东, 赵栋利等. 直驱式风力发电系统的仿真建模与运行特性研究[J]. 电力自动化设备, 2009(2), 1-5.
- [11] 刘春海. PWM 整流器预测电流控制研究[D]. 北京: 北京交通大学电气工程学院. 2006.
- [12] 李伟, 张黎. 交-直-交传动系统网侧变流器预测电流控制方法的计算机仿真及实现[J]. 中车铁道科学, 2002(23).
- [13] 任亮, 汤钰鹏, 郑丹, 等. 基于网侧功率不平衡的电网不对称时三相 VSR 控制方法研究[J]. 自动化技术与应用, 2007, 26(11):86-123.

#### 作者简介:

梅雪峰 (1986—), 男, 江苏东台人, 硕士, 从事电网调度运行工作, Email: mei\_xf@yeha.net。