

双馈风力发电机 PWM 变流器控制策略优化研究

刘国华¹, 胡东平², 黄 波¹

(1. 南京南瑞集团公司, 江苏 南京 210003)

(2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘 要: 为了提升脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation,PWM)变流器在电网发生不平衡故障时的控制能力,对变流器控制策略进行优化,设计了基于电流平衡和基于功率平衡的功率外环控制策略,并在仿真实验系统中进行了模拟、分析与验证。结果表明:该方法能够更有效地实现对机组的控制,故障期间对直流电压纹波的抑制效果很好,可稳定控制直流电压,有效降低有功功率波动,提升电网稳定水平。

关键词: 风力发电; 双馈发电机; 变流器; 控制策略

中图分类号: TM614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-3643(2014)06-0033-04

有效访问地址: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2014.06.007>

Control strategies optimal design of pulse width modulation converters for doubly fed induction wind power generator

LIU Guohua¹, HU Dongping², HUANG Bo¹

(1. Nanjing NANRI Group Corporation Nanjing Jiangsu 210003, China;

(2. China Electric Power Research Institute Beijing 100192, China)

Abstract: For the sake of improving control ability of pulse width modulation (PWM) converters when the power grid breaks down, optimizes control strategy of converter, separately designs power loop control strategies based on current balance and power balance, through modeling simulates control effects. The result shows that the method can effectively control the units with better effect of suppressing DC voltage ripple in period of failure, control DC voltage steadily, reduce active power fluctuation and improve stability level of power grid.

Key words: wind power generation; doubly fed induction generator; converter; control strategy

DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2014.06.007

双馈电机以其独特的优势在风力发电领域得到了广泛应用^[1],特别是对大功率风力发电机而

言,双馈型风力发电机占据了较大的市场份额,对双馈电机运行控制性能的要求也越来越高。决定

收稿日期:2014-07-25

作者简介:刘国华(1972),男,工学硕士,高级工程师,从事电力系统自动化及发电机励磁控制研究设计工作。

双馈电机运行性能的关键在于电机控制系统,因此双馈电机控制策略的研究也得到了广泛关注^[2]。变流器作为双馈风力发电机的控制部件是实现电机控制的核心,其控制策略的选择可以有效提升变流器控制水平。

已有研究实现了双馈风机变流器定子磁场矢量控制系统的设计与仿真^[3-4],提出了在电网电压骤降情况下的变流器控制策略,建立了定子励磁电流动态过程的精确模型^[5]。针对双馈发电机故障穿越能力弱的问题,提出了基于双滞环电流矢量控制的故障穿越策略^[6],分析并设计了实现低电压穿越的技术手段及改进控制策略^[7-8]。在电网对称及非对称故障时,已有研究分析了双馈发电机定子磁链对转子的影响,提出了软硬件结合实现低电压穿越的控制策略^[9]。本文将变流器控制策略与低电压穿越控制策略相结合,针对电网不平衡等工况对变流器的控制策略开展了优化设计研究。

1 PWM 变流器控制原理和数学模型

1.1 PWM 变流器控制原理

双馈风力发电机脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)变流器是连接发电机和电网的主要部件, PWM 变流器由两个完全相同的电压型三相 PWM 变流器通过直流母线连接而成,拓扑结构如图 1 所示^[10-11]。

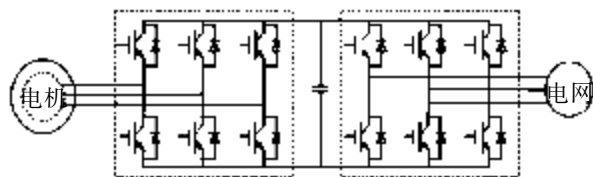


图 1 PWM 变流器拓扑结构

PWM 变流器包括网侧和机侧两部分,变流器采用 PWM 调制方法,消除了低次谐波,对电网和发电机造成的影响小,在谐波性能上能满足发电机励磁要求,是兆瓦级变速恒频风力发电机首选变流器形式,同时 PWM 变流器采用适宜的控制策略能够提高发电机运行效率。

1.2 PWM 变流器数学模型

PWM 变流器等效电路如图 2 所示,以网侧部

分为例分析如下。

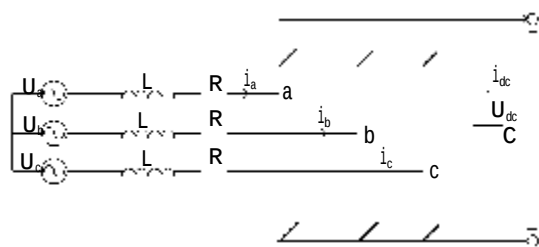


图 2 网侧变流器等效电路

图 2 中 u_a, u_b, u_c 为变流器交流侧三相电压, i_a, i_b, i_c 为变流器交流侧三相输入电流, L, R 分别为交流侧各相等值电感与电阻, u_{dc}, i_{dc} 分别为储能电容 C 的电压和电流。在等效电路中将变流器中电力电子开关作为理想开关考虑, 假设交流侧电动势三相平衡, 则有

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a &= e_a - (v_{aN} + v_{N0}) \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b &= e_b - (v_{bN} + v_{N0}) \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c &= e_c - (v_{cN} + v_{N0}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: v_{kN} —桥臂电压($k=a, b, c$);

v_{N0} —负母线与电网中性点之间的电压。

进一步推得变流器在三相静止坐标系下的数学模型为:

$$\begin{bmatrix} L_p i_a \\ L_p i_b \\ L_p i_c \\ C_p v_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & & & \\ & -R & & \\ & & -R & \\ & & & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_{load} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a - v_a \\ e_b - v_b \\ e_c - v_c \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $L_p i_a, L_p i_b, L_p i_c$ —三相电感磁链变化率;

$C_p v_{dc}$ —直流母线电容电荷变化率;

i_{load} —直流侧负载电流;

v_a, v_b, v_c —变流器交流侧三相电压。

PWM 变流器在三相静止坐标系下的数学模型比较直观,物理意义明确,但不利于进一步分析其控制策略,需推导出其在两相旋转坐标系下的数学模型。通过坐标变换并推导出旋转坐标系下 PWM 变流器的数学模型:

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di_q}{dt} + \omega_s L i_d + R i_q &= e_q - s_q v_{dc} \\ L \frac{di_d}{dt} + \omega_s L i_q + R i_d &= e_d - s_d v_{dc} \\ C \frac{dv_{dc}}{dt} &= \frac{3}{2} (i_q s_q + i_d s_d) - i_{load} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: i_q, i_d —电流的 d、q 轴分量;

ω_s —电网电压角频率;

e_q, e_d —电网电压的 d、q 轴分量;

s_q, s_d —开关状态等效 d、q 轴分量;

v_{dc} —直流电压。

网侧变流器从电网吸收的有功功率和无功功率分别为

$$\begin{cases} P = e_d i_d + e_q i_q \\ Q = e_q i_d - e_d i_q \end{cases} \quad (4)$$

此时若将同步旋转坐标的 d 轴定向于电网电压, 则 $e_q=0$, 得出

$$\begin{cases} P = e_d i_d \\ Q = -e_d i_q \end{cases} \quad (5)$$

这样实现了网侧有功和无功分量的解耦, 且 d、q 轴上的电流分量可以分别直接控制网侧的有功功率和无功功率, 这是网侧变流器经典控制策略的基本思想。

2 PWM 变流器控制策略优化

2.1 电网不平衡故障时变流器经典控制策略存在的不足

当电网发生不对称故障时, 若采用上述基于旋转坐标系的双闭环经典控制策略, 对于不对称电量正序、负序和零序 3 部分, 零序分量不会对电机控制产生影响, 正序分量也可以利用双闭环控制策略进行控制, 但负序分量是以同步速反向旋转, 必然会在同步旋转坐标系上产生 2 倍频电量, 反映在控制结果中就会产生二次谐波, 使得网侧变流器的电流不平衡, 直流侧的电压会发生较大的振荡。

2.2 PWM 变流器控制策略优化

针对电网发生不对称故障, 设网侧三相输入阻抗平衡, 可建立如下方程:

$$E_{\alpha\beta} = V_{\alpha\beta} + R I_{\alpha\beta} + L \frac{dI_{\alpha\beta}}{dt}$$

式中: $E_{\alpha\beta}$ 、 $V_{\alpha\beta}$ 、 $I_{\alpha\beta}$ —分别为电网电压、变流器交流侧电压和电流的 α 、 β 轴分量。

将正负序电量分解, 正序分量和负序分量在各自的旋转坐标系中均为直流量, 在电流内环控

制中加入负序电流环控制对负序电流进行调节, 可以解决负序电流对控制的影响。

外环控制根据控制目标不同分为电流平衡外环和功率平衡外环控制。

(1) 电流平衡功率外环控制

当电网发生不对称故障时, 机侧会向网侧灌入功率, 网侧变流器受电压跌落的影响将会发生不对称现象, 受模块保护的限制, 网侧输送功率的能力将下降。若以电流对称作为控制目标, 将能提高不对称故障期间网侧变流器功率输送能力, 减小直流侧电压波动。

按电流平衡的控制目标, 有

$$\begin{cases} i_d^{+*} = 0 \\ i_q^{+*} = 0 \end{cases}$$

经推导可得到电流正负序给定值为

$$\begin{cases} i_d^{+*} = \frac{P_0 u_{gd}^{+}}{(u_{gd}^{+})^2 + (u_{gq}^{+})^2} \\ i_q^{+*} = \frac{P_0 u_{gq}^{+}}{(u_{gd}^{+})^2 + (u_{gq}^{+})^2} \\ i_d^{-*} = 0 \\ i_q^{-*} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: u_{gd} 、 u_{gq} —d、q 轴电网电压的正序分量;

P_0 —有功功率的直流分量。

(2) 功率平衡功率外环控制

当电网发生不对称故障时, 忽略输入阻抗中不平衡功率并取单位功率因数, 进一步推导得到各电流分量给定值:

$$\begin{bmatrix} i_d^{+*} \\ i_q^{+*} \\ i_d^{-*} \\ i_q^{-*} \end{bmatrix} = \frac{2P_0}{3D} \begin{bmatrix} u_{gd}^{+} \\ u_{gq}^{+} \\ -u_{gd}^{-} \\ u_{gq}^{-} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $D = (u_{gd}^{+})^2 + (u_{gq}^{+})^2 - (u_{gd}^{-})^2 + (u_{gq}^{-})^2$

3 优化控制策略对比仿真结果分析

针对经典变流器控制策略和优化控制策略, 在电网不平衡故障时进行对比仿真。仿真参数为: 网侧电抗器 280 μH , 直流电容 20 mF, 直流电容并联电阻 2 250 Ω , 交流电压 690 V, 直流控制电压 1 100 V。

仿真结果如下:

(1) 电网发生 20% 不对称跌落时采用经典控制策略时的仿真波形如图 3 所示。

当电网发生 20% 不对称跌落故障时, 如果采用经典控制策略, 直流电压波动在 1 075 V 和 1 110 V 之间, 纹波为 35 V 左右 (如图 3a), 有功功率波动为 150 kW 至 350 kW 之间 (如图 3b), 比例积分 PI 调节器^[12]不能实现有效跟踪控制。

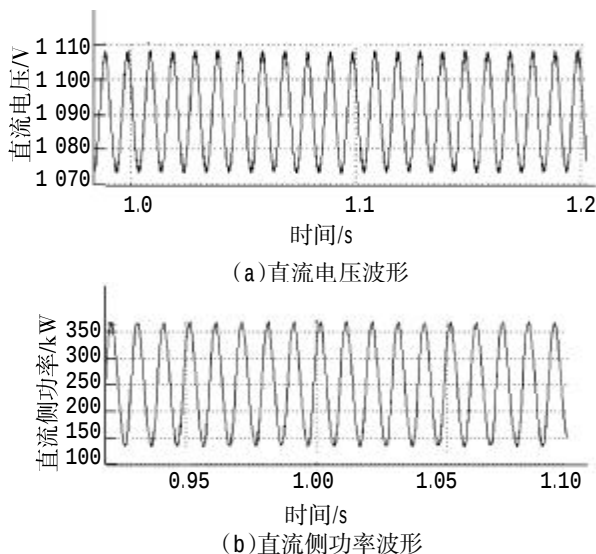


图 3 采用经典控制策略的仿真波形

(2) 电网发生 20% 不对称跌落时使用电流平衡控制策略的仿真波形如图 4 所示。

当电网发生 20% 不对称跌落故障时, 使用基于电流平衡的功率外环控制策略, 故障期间能够保持网侧电流的对称, 直流电压波动在 1 095 V 和 1 105 V 之间, 纹波为 10 V 左右 (如图 4a), 有功功率波动为 200 kW 至 300 kW 之间 (如图 4b), 总体控制效果较好。

(3) 电网发生 20% 不对称跌落时功率平衡控制方法的仿真波形如图 5 所示。

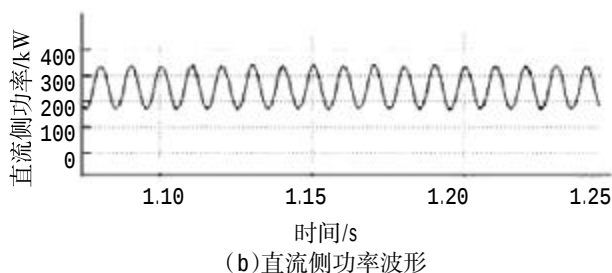
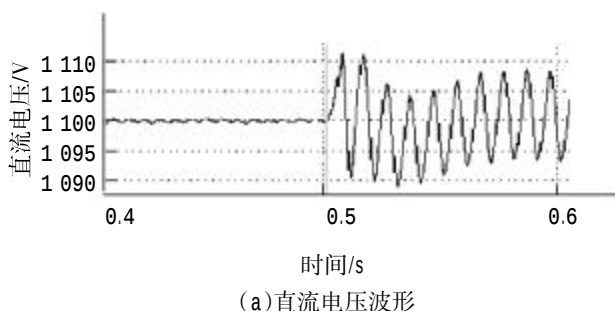


图 4 采用电流平衡控制策略的仿真波形

当电网发生 20% 不对称跌落故障时, 直流电压波动在 1 090 V 和 1 105 V 之间, 纹波为 15 V 左右 (如图 5a), 有功功率波动为 230 kW (如图 5b), 使用基于功率平衡的功率外环控制策略对直流电压纹波的抑制效果很好, 能将直流电压控制稳定。

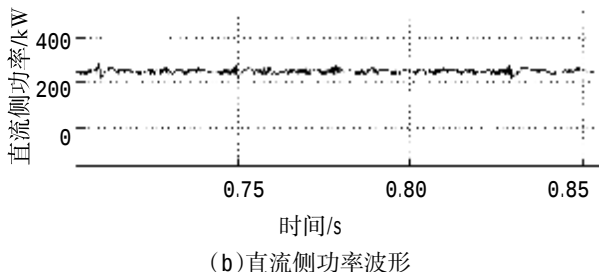
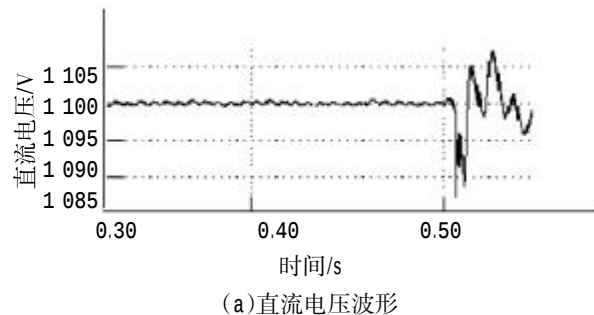


图 5 采用功率平衡控制策略的仿真波形

4 结论

通过设计电流平衡和功率平衡两种优化控制策略, 并结合仿真控制结果与经典控制方法进行对比分析, 得出以下结论:

(1) 经典控制策略会在同步旋转坐标系上产生 2 倍频电量, 在控制结果中会产生二次谐波, 使网侧变流器电流不平衡, 直流侧电压发生较大振荡。

(2) 使用基于电流平衡的功率外环控制优化策略, 故障期间能够保持网侧电流的对称, 内环正、负序的电流环调节能够有效跟(下转第 56 页)