

DOI: 10.7667/PSPC170533

基于重复和准比例谐振复合的直驱风机网侧变流器控制策略

徐红灿¹, 滕予非², 王晓茹¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 为了提高电网电压不平衡及畸变条件下永磁直驱同步风电机组的运行性能, 提出了一种基于重复控制与准比例谐振控制复合的直驱风机网侧变流器控制策略。该控制策略根据电网电压不平衡条件下变流器控制目标得到电流指令值, 在两相静止坐标系下利用复合控制, 实现对基频电流的无静差跟踪, 并抑制交流电网谐波的干扰。在提出控制系统详细框图的基础上, 对各个控制环节的设计方法进行了研究, 并评估了控制效果。仿真结果表明, 该控制策略在电网电压不平衡及畸变的工况下, 能有效抑制有功功率波动, 降低电流谐波畸变率, 验证了策略的正确性。

关键词: 电网电压不平衡; 谐波; 直驱风机; 准比例谐振控制; 重复控制

A control strategy combining repetitive control and quasi-PR control for PMSG grid-side converter

XU Hongcan¹, TENG Yufei², WANG Xiaoru¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China)

Abstract: In order to improve the performance of the Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) under unbalanced and distorted grid voltage operating conditions, a novel Control Strategy Combining Repetitive (REP) control and Quasi-Proportional Resonant (QPR) control is proposed for PMSG grid-side converter. In the proposed control strategy, the current commands are dependent on the objectives of converter control when the grid voltage is unbalanced. The hybrid control strategy is applied in the two-phase stationary reference frame to eliminate the steady-state tracking error on the fundamental frequency current and suppress the total harmonic distortion. The block diagram of control system is presented, and the design methods of each block are studied. Meanwhile, the effect of the control strategy is investigated. Finally, the simulation results show that the proposed control strategy can effectively suppress active power pulsation and reduce the total harmonic distortion under unbalanced and distorted grid voltage operating conditions, verifying the correctness of the strategy.

Key words: grid voltage unbalance; harmonics; direct drive wind generator; quasi-proportional resonance control; repetitive control

0 引言

在环境与能源问题日益加剧的背景下, 风力发电因其清洁可再生的特点得到快速发展。永磁直驱同步风电机组 (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG) 具有效率高、故障率低和运维成本低等优点, 近年来成为主流风电机型之一^[1]。

我国适合大规模开发风电的地区一般都远离负荷中心, 甚至远离主干电网, 使得风电机组所联实质上是一个存在电压跌落、电压不平衡和谐波畸变等各种运行风险的“弱电网”^[2]。电网电压不平

衡会恶化直驱风机的运行性能, 造成风机馈入电网的功率发生 2 倍于电网频率的波动, 并导致直流侧电压发生振荡^[3-5]。另一方面, 电网中存在的谐波将导致风机输出电流畸变, 恶化发输电系统的电能质量^[6-8]。因此, 研究直驱风机在电网电压不平衡和畸变工况下的控制策略, 使其满足风电并网要求, 提高其在电网电压不平衡下的运行性能, 减少并网电流谐波, 对直驱风机高效稳定并网运行具有重要意义。

针对电网电压不平衡下直驱风机的运行控制, 文献[4,9-10]等采用了一种基于双旋转坐标系的正

负序电流控制, 根据不同的控制目标产生正负序电流指令值, 实现了输出功率稳定控制及抑制负序电流等。但是该方案需要构造 4 个闭环控制器, 系统结构复杂, 参数整定较为困难, 不利于实现。因此, 文献[11]将双旋转坐标系下的电流指令值经坐标变换得到两相静止坐标系的电流指令值, 进而通过内模控制实现对电流指令值的无静差跟踪。基于静止坐标系的控制方案只需要 2 个闭环控制器, 降低了控制的复杂度。文献[12]基于文献[11], 在静止坐标系下采用比例谐振方法实现电流控制, 然而由于比例谐振控制器^[13]具有带宽小的缺点, 控制效果易受电网频率偏移的影响, 因而也有文献建议采用带宽较大的准比例谐振(Quasi Proportional Resonant, QPR)控制器实现无静差跟踪。

针对电网电压畸变的工况, 大量学者采用了重复控制(Repetitive, REP), 其能够对周期性误差进行逐周期补偿, 从而抑制周期性干扰, 具有较好的稳态性能^[14-15]。文献[16]对比分析了两种不同结构的重复控制与 PI 控制相结合的复合控制方法, 对其稳定性和谐波抑制特性等进行了比较。

然而, 针对弱联系电网中运行的直驱风机, 能够同时应对电网电压不平衡及畸变工况的控制策略尚少见报道。基于此, 本文提出一种新的直驱风机网侧变流器控制策略。根据电网电压不平衡下的控制目标, 计算得到静止坐标系下的电流指令值, 采用准比例谐振与重复控制并联的复合控制策略, 实现对指令值的无静差跟踪, 通过仿真验证了控制策略的有效性。

1 网侧变流器数学模型

PMSG 一般采用背靠背变流器, 其中网侧变流器的典型原理图如图 1 所示^[17]。变流器经 LCL 滤波器并网, 同时, 在电容支路上串联阻尼电阻, 以削弱 LCL 滤波器的谐振峰。

图 1 中, L_f 、 L_g 、 C_f 分别为变流器侧电感、网侧电感及滤波电容, R_c 为串联阻尼电阻; C_{dc} 、 u_{dc} 分别为直流电容及其电压; u_i 为变流器输出电压; e_{abc} 、 i_{gabc} 分别为三相电网电压和三相并网电流。

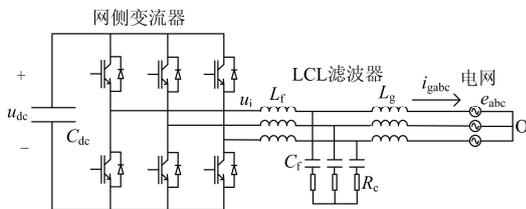


图 1 LCL 型网侧变流器电路图

Fig. 1 Topology of LCL-filtered grid-side inverter

根据图 1 可以得到, 并网电流 $i_g(s)$ 和变流器输出电压 $u_i(s)$ 之间的传递函数为

$$G_p(s) = \frac{C_f R_c s + 1}{L_g C_f L_f s^3 + C_f (L_g + L_f) R_c s^2 + (L_g + L_f) s} \quad (1)$$

目前变流器采用的调制方式开关频率普遍很高, 可以将逆变单元看成一个增益环节 K_{PWM} ^[15], 则网侧变流器的传递函数可以表示为

$$P(s) = K_{PWM} G_p(s) = \frac{K_{PWM} (C_f R_c s + 1)}{L_g C_f L_f s^3 + C_f (L_g + L_f) R_c s^2 + (L_g + L_f) s} \quad (2)$$

特别地, 当电网电压不平衡时, 变流器网侧视在复功率 S 为^[18]

$$S = P_g + jQ_g = (P_{g,0} + P_{g,c2} \cos 2\omega t + P_{g,s2} \sin 2\omega t) + j(Q_{g,0} + Q_{g,c2} \cos 2\omega t + Q_{g,s2} \sin 2\omega t) \quad (3)$$

式中: P_g 、 Q_g 分别为有功、无功功率; 下标 0、s2、c2 分别表示功率的平均分量和二倍频正、余弦波动分量; ω 为同步电角速度。由此可见, 该工况下变流器网侧有功功率和无功功率都含有二次谐波分量, 导致电网出现功率波动。

将式(3)进行派克变换, 可以得到同步旋转 dq 坐标系下, 功率各分量表达式为

$$\begin{bmatrix} P_{g,0} \\ P_{g,c2} \\ P_{g,s2} \\ Q_{g,0} \\ Q_{g,c2} \\ Q_{g,s2} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} e_d^P & e_q^P & e_d^N & e_q^N \\ e_d^N & e_q^N & e_d^P & e_q^P \\ e_q^N & -e_d^N & -e_q^P & e_d^P \\ e_q^P & -e_d^P & e_q^N & -e_d^N \\ e_q^N & -e_d^N & e_q^P & -e_d^P \\ -e_d^N & -e_q^N & e_d^P & e_q^P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{gd}^P \\ i_{gq}^P \\ i_{gd}^N \\ i_{gq}^N \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: e 、 i_g 分别为电网电压、并网电流; 上标 P、N 分别为正序、负序分量; 下标 d 、 q 分别为同步旋转坐标系下的 d 、 q 分量。

2 直驱风机网侧变流器控制原理

2.1 控制原理及框图

为了抑制弱联系电网中, 并网点电压不平衡以及电压畸变对永磁直驱风机的影响, 本文提出了一种基于重复和准比例谐振复合的直驱风机网侧变流器控制策略, 其控制框图如图 2 所示。

由图 2 可知, 该控制策略通过不平衡电流控制指令计算方法, 得到静止坐标系下的电流指令值, 进而通过准比例谐振控制实现对电流指令值的无静差跟踪。同时, 为了抑制电网中谐波畸变的影响, 在控制系统中引入了重复控制。

以下将对控制系统的各环节进行详细描述。

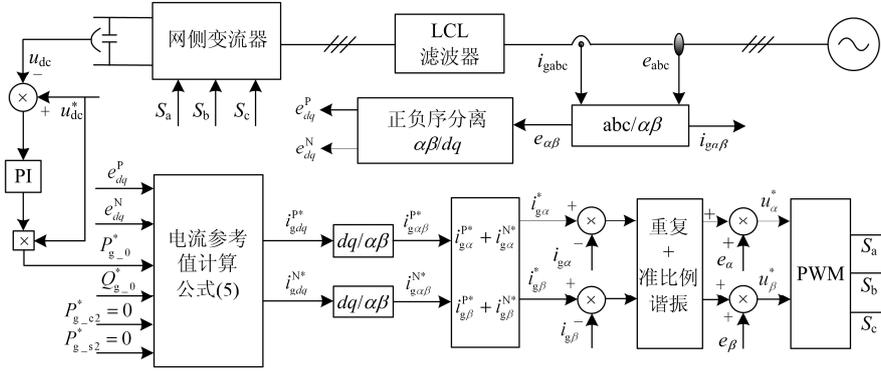


图 2 基于重复与准比例谐振复合的控制系统

Fig. 2 Block diagram of the proposed control system combining repetitive control and quasi-PR control

2.2 电网不平衡工况下变流器电流控制指令算法

由式(4)可知, 网侧变流器输出功率的平均值及二倍频分量与并网电流正负序下 dq 轴四个分量有关, 因此, 令 $P_{g_s2}^* = P_{g_c2}^* = 0$ 。将 $P_{g_s2}^* = P_{g_c2}^* = 0$ 代入式(4), 即可通过控制正负序电流, 消除有功功率二倍频波动。同时, 控制平均无功功率为零, 实现单位功率因数控制, 可得到并网电流的指令值为

$$\begin{cases} i_{gd}^{P*} \\ i_{gq}^{P*} \\ i_{gd}^{N*} \\ i_{gq}^{N*} \end{cases} = \begin{bmatrix} e_d^P & e_q^P & e_d^N & e_q^N \\ e_q^P & -e_d^P & e_q^N & -e_d^N \\ e_q^N & -e_d^N & -e_q^P & e_d^P \\ e_d^N & e_q^N & e_d^P & e_q^P \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} P_{g_0}^* \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2P_{g_0}^*}{3D} \begin{bmatrix} e_d^P \\ e_q^P \\ -e_d^N \\ -e_q^N \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$D = \left[(e_q^P)^2 + (e_d^P)^2 \right] - \left[(e_q^N)^2 + (e_d^N)^2 \right]$$

式中, $P_{g_0}^*$ 为变流器平均有功功率指令, 其与直流电容电压平均值有关。当直流电容电压采用 PI 控制器时, 控制器输出为直流电容支路电流指令值, 进而可得

$$P_{g_0}^* = \left[\left(K_{pdc} + \frac{K_{idc}}{s} \right) (u_{dc}^* - u_{dc}) \right] u_{dc}^* \quad (6)$$

式中: K_{pdc} 、 K_{idc} 分别为控制器比例系数和积分增益; u_{dc}^* 为直流电容电压指令值。

若要对式(5)中的电流指令值 i_{gd}^{P*} 、 i_{gq}^{P*} 、 i_{gd}^{N*} 、 i_{gq}^{N*} 进行无静差跟踪控制, 一般采用四个 PI 电流控制环, 但系统结构复杂, 且需独立检测各个电流分量。因此可以将正负序 dq 坐标轴下的电流指令值通过坐标变换得到 $\alpha\beta$ 坐标轴下的电流指令值, 即

$$i_{\alpha\beta}^* = i_{\alpha\beta}^{P*} + i_{\alpha\beta}^{N*} = i_{gdq}^{P*} e^{j\omega t} + i_{gdq}^{N*} e^{-j\omega t} \quad (7)$$

因而可以在 $\alpha\beta$ 坐标轴中, 对电流指令值进行无静差跟踪。在这种方式下, 只需获得网侧电流 $\alpha\beta$ 轴的反馈量, 无需正负序电流分离, 简化了控制系

统, 系统动态响应能力得到提升。

2.3 重复控制与准比例谐振控制复合控制策略原理

考虑电流指令值为以基波角频率变化的正弦信号, 可以采用准比例谐振控制, 并与重复控制并联, 共同对电流信号进行控制, 增强控制系统的性能。电流控制的结构图如图 3 所示。

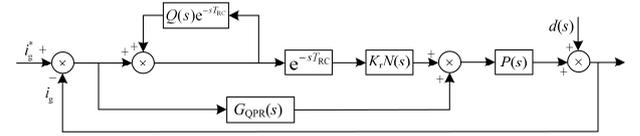


图 3 电流控制系统框图

Fig. 3 Block diagram of the current control system

准比例谐振控制器的传递函数为^[19]

$$G_{QPR}(s) = k_{pc} + \frac{2k_{rc}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_n^2} \quad (8)$$

式中: k_{pc} 为比例系数; k_{rc} 为谐振系数; ω_n 为基波频率; ω_c 为截止频率。准比例谐振控制器既保持了比例谐振控制器在谐振频率点增益较大的优点, 又可通过合理选择 ω_c 来拓宽谐振频率处的带宽, 在电网频率发生偏移的情况下还能对信号进行有效的控制。

重复控制是一种基于内模原理的控制方法, 利用扰动的周期性规律, “记忆”谐波信号的发生位置, 逐周期地修正输出信号, 从而消除基波的周期性畸变, 对周期性扰动具有良好的抑制效果。其传递函数为

$$G_{RC}(s) = \frac{e^{-sT_{RC}}}{1 - Q(s)e^{-sT_{RC}}} k_r N(s) \quad (9)$$

式中: $Q(s)$ 通常为一个小于 1 的常数, 用于改善重复控制器的稳定性; $e^{-sT_{RC}}$ 为延时环节, T_{RC} 为被控信号的周期; k_r 为重复控制器的比例系数; $N(s)$ 为针对控制对象设计的补偿函数。

3 控制器设计及性能分析

由图 3 可得电流输入到输出的闭环传递函数为

$$\frac{i_g}{i_g^*} = \frac{[e^{sT_{RC}} - Q(s)]P(s)G_{QPR}(s) + k_r N(s)P(s)}{[e^{sT_{RC}} - Q(s)][1 + P(s)G_{QPR}(s)] + k_r N(s)P(s)} \quad (10)$$

由式(10)可得闭环传递函数的特征多项式为

$$\Delta = [e^{sT_{RC}} - Q(s)][1 + G_{QPR}(s)P(s)] + k_r N(s)P(s) = [1 + G_{QPR}(s)P(s)] \cdot \left\{ e^{sT_{RC}} - \left[Q(s) - \frac{k_r N(s)P(s)}{1 + P(s)G_{QPR}(s)} \right] \right\} = \Delta_1 \Delta_2 \quad (11)$$

系统稳定的充要条件是闭环传递函数的极点都在单位圆内,因而若要保证系统稳定,式(11)中 Δ_1 和 Δ_2 的根需均在单位圆内^[20]。 $\Delta_1=0$ 的根在单位圆内的条件是 QPR 控制器单独作用时系统稳定, $\Delta_2=0$ 的根在单位圆内的条件是以 $P'(s)$ 为等效控制对象的重复控制器单独作用时系统稳定,其中

$$P'(s) = \frac{P(s)}{1 + G_{QPR}(s)P(s)} \quad (12)$$

当准比例谐振控制器单独作用时,系统闭环传递函数为

$$\frac{i_g}{i_g^*} = \frac{G_{QPR}(s)P(s)}{1 + G_{QPR}(s)P(s)} = \frac{B_1 s^3 + B_2 s^2 + B_3 s + B_4}{A_1 s^5 + A_2 s^4 + A_3 s^3 + A_4 s^2 + A_5 s^1 + B_4} \quad (13)$$

式中

$$\begin{cases} B_1 = C_f R_c k_{pc} K_{PWM} \\ B_2 = k_{pc} K_{PWM} + 2C_f K_{PWM} R_c \omega_c (k_{pc} + k_{rc}) \\ B_3 = K_{PWM} C_f k_{pc} R_c \omega_n^2 + 2K_{PWM} \omega_c (k_{pc} + k_{rc}) \\ B_4 = K_{PWM} k_{pc} \omega_n^2 \\ A_1 = C_f L_f L_g \\ A_2 = C_f (L_g + L_f) + 2C_f L_f L_g \omega_c \\ A_3 = C_f L_f L_g \omega_n^2 + (L_g + L_f)(1 + 2C_f \omega_c) + C_f R_c k_{pc} K_{PWM} \\ A_4 = k_{pc} K_{PWM} + 2(L_g + L_f) \omega_c + C_f (L_g + L_f) \omega_n^2 + 2C_f K_{PWM} R_c \omega_c (k_{pc} + k_{rc}) \\ A_5 = (L_g + L_f) \omega_n^2 + 2K_{PWM} \omega_c (k_{pc} + k_{rc}) + C_f k_{pc} K_{PWM} R_c \omega_n^2 \end{cases} \quad (14)$$

此时,特征多项式为

$$D(s) = A_1 s^5 + A_2 s^4 + A_3 s^3 + A_4 s^2 + A_5 s^1 + B_4 \quad (15)$$

针对式(15),可以根据劳斯判据求得使系统稳定的控制参数取值范围。进而在保证系统稳定的条件下,综合考虑系统稳态误差、相位裕度和幅值裕度等,对 QPR 控制器参数进行设计。

ω_c 决定控制器带宽,一般取 5~10 rad/s,本文取 5 rad/s; k_{rc} 影响谐振峰值的增益,可以减小稳态误差,本文取 50; k_{pc} 影响系统稳定性及动态响应,本文取 4。将 LCL 滤波器参数 $L_f=0.35$ mH、 $L_g=0.15$ mH、 $C_f=18$ μ F、 $R_c=1$ Ω 、 $K_{PWM}=1$ 以及 QPR 控制器参数代入式(15),可知特征多项式满足劳斯判据对系统稳定的要求,也即 QPR 控制器单独控制时,系统稳定。

重复控制器的设计需满足以 $P'(s)$ 为等效控制对象时系统稳定。等效控制对象的 Bode 图如图 4 所示。

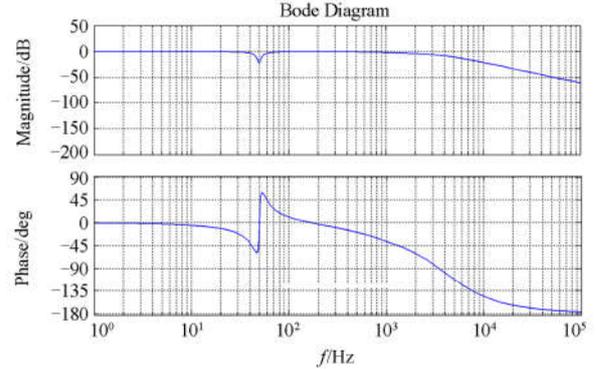


图 4 等效控制对象 Bode 图

Fig. 4 Bode diagram of the equivalent control object

由图 4 可知,等效控制对象的低频增益接近于零,但是中高频的衰减特性不理想,具有一定的相位滞后。同时也可以看到,LCL 滤波器中的串联电阻很好地消去了谐振峰。

在实际应用中,重复控制器的延迟环节 $e^{-sT_{RC}}$ 通常被离散化为 z^{-N} (N 为信号周期与采样周期之比),进而采用数字控制方式实现。本文在连续域中完成设计,可以采用双线性离散等方法进行离散化。重复控制通常按照中低频对消、高频衰减的原则进行设计,根据被控对象特性,设计 $Q(s)$ 、 k_r 和 $N(s)$ 如下。

$Q(s)$ 用来增强重复控制内模稳定性,可以是低通滤波器,也可以是略小于 1 的常数,本文取 $Q(s)$ 为 0.95。

重复控制增益 k_r 用于幅值补偿, k_r 增大则误差收敛速度加快,但系统稳定性减弱。本文取 k_r 为 0.8。

$N(s)$ 是根据被控对象的特性而设计的补偿环节, 决定了控制系统的性能, 通常由二阶低通滤波器 $C_1(s)$ 、超前环节 e^{sT_c} 等组成。

$$N(s) = e^{sT_c} C_1(s) \quad (16)$$

1) 二阶低通滤波器用于提供高频衰减, 其在 s 域中的表达式为

$$C_1(s) = \frac{\omega_m^2}{s^2 + 2\xi\omega_m s + \omega_m^2} \quad (17)$$

式中: ω_m 为截至频率; ξ 为阻尼比。本文 LCL 滤波器的谐振频率为 23 002 rad/s, 因此取 ω_m 为 23 002 rad/s。 ξ 一般取 0.707。

2) e^{sT_c} 为超前环节, 用来补偿带来的相位滞后, 通过试验可得, T_c 取 0.000 15 s 效果最好。

在进行补偿之后, 采用复合控制的控制效果如图 5 所示。

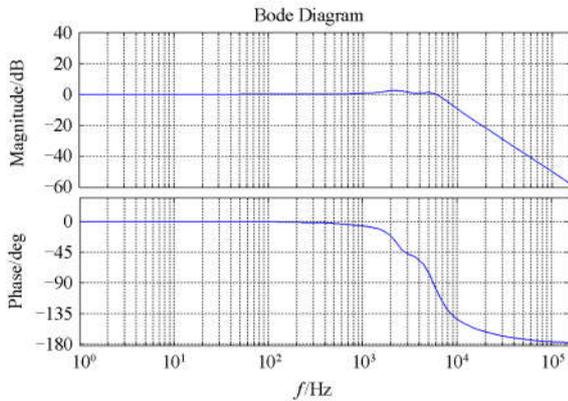


图 5 补偿后系统 Bode 图

Fig. 5 Bode diagram of the system after compensation

由图 5 可知, 复合控制系统在中低频近似零增益和零相移, 在中高频增益迅速衰减, 具有良好的稳定性及抗干扰性能。

4 仿真分析

为了验证本文控制策略的正确性, 在 PSCAD 上建立了一台 2 MW 永磁同步风电机组经箱式变压器接无穷大电源的仿真模型^[21]。本文分别给出了采用传统 PI 控制、准比例谐振控制和本文提出的控制策略下直驱风电机组的仿真结果, 以此来进行对比。其中, 单独的准比例谐振的控制参数与本文复合控制中准比例谐振的控制参数一致。

控制参数及 LCL 滤波器参数如上文所述。仿真的主要参数如表 1 所示。

4.1 单相短路故障

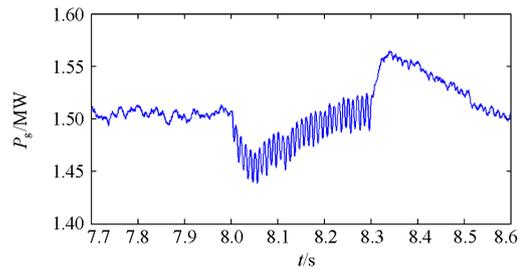
对本文在电网电压不平衡条件下采用的控制目

表 1 仿真系统主要参数

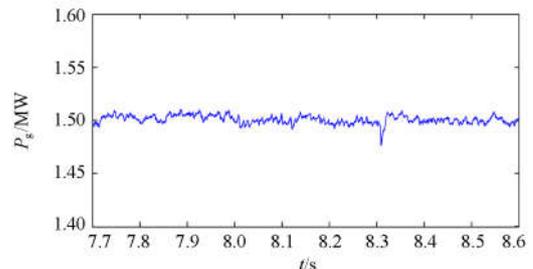
Table 1 Main parameters of the simulation system

参数	取值
直流电容 C_{dc}	18 μ F
直流电压参考值 u_{dc}^*	1.2 kV
风机出口电压	690 V
系统电压	11 kV
系统频率	50 Hz
风速	10.5 m/s
有功功率平均值	1.5 MW
无功功率平均值	0 Mvar

标进行验证, 设置在 8 s 时 A 相单相短路, 故障持续时间 0.3 s, 三种控制策略下输出有功功率及直流电容电压如图 6 所示。



(a) 传统 PI 控制下的有功功率和直流电压



(b) QPR 控制下的有功功率和直流电压

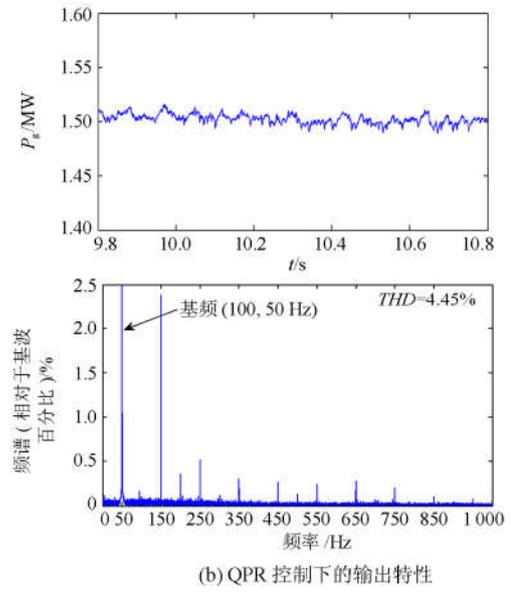
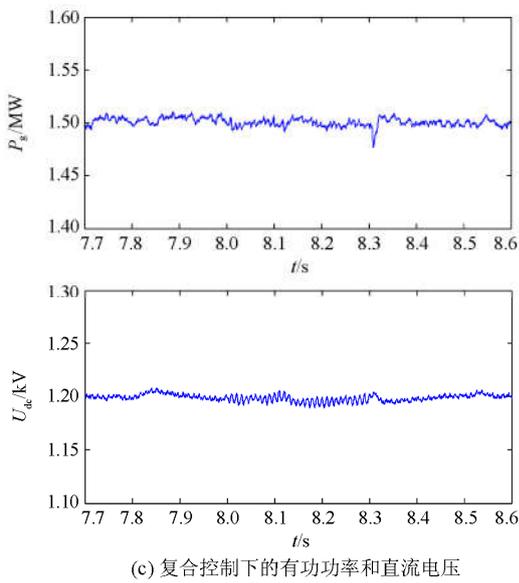


图 6 单相短路故障下三种控制方法的对比

Fig. 6 Comparison of performances of three controllers under single-phase short-circuit condition

如图 6 所示,单相短路故障时,传统 PI 控制未采取相应措施,有功功率和直流电容电压都出现了波动,而准比例谐振和本文的复合控制,都能对正负序电流进行控制,消除了有功功率波动,进而也抑制了直流电容电压波动。

4.2 电压不平衡且有谐波电流注入

考察不同控制在电压不平衡且有谐波注入的复杂工况下的控制效果。在 10 s 时, A 相电压跌落 0.5 kV, 并突加 10% 的 3 次和 10% 的 5 次谐波, 三种控制方法下有功功率波形及输出电流频谱图如图 7 所示。

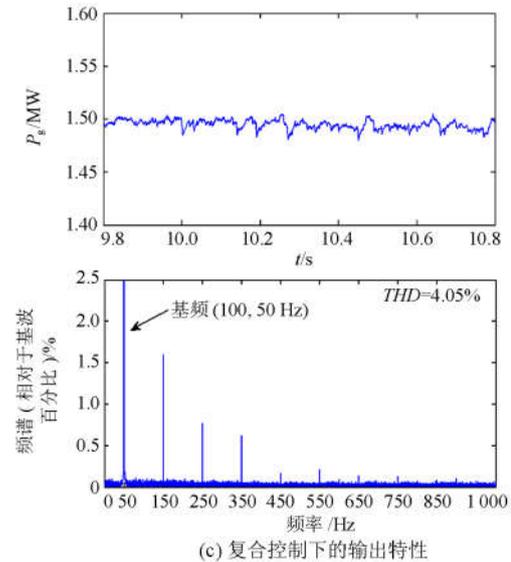


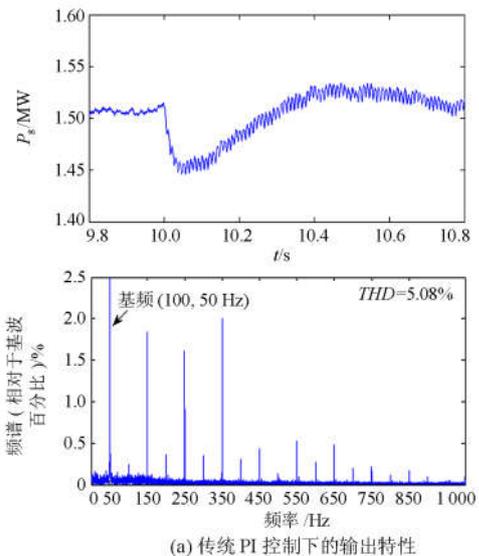
图 7 复杂电网条件下输出特性的对比

Fig. 7 Comparison of output performances under complex power grid conditions

由图 7 可知,准比例谐振控制和复合控制都能在电网电压不平衡条件下,抑制有功功率的波动。在复杂工况下,复合控制的谐波畸变率最低,输出电流保持了较好的正弦度,相比于准比例谐振控制,复合控制由于加入了重复控制,具有抑制周期性扰动的良好性能。

5 结论

本文从提高直驱风机在电网电压不平衡及畸变条件下的运行性能出发,提出一种新的直驱风机变流器控制策略。将双旋转坐标下的正负序电流指令值,变换到静止坐标系下进行无静差跟踪,实现



了电网电压不平衡下的控制目标,且简化了控制结构。将重复控制与准比例谐振控制结合,充分利用了两者的优势,提高了直驱风机的动态和稳态性能。本文详细描述了该控制系统的逻辑框图,提出了控制器的设计方法。仿真结果表明,该控制策略在电网电压不平衡及谐波畸变情况下,能有效抑制直驱风机输出有功功率波动,降低输出电流谐波畸变率。

参考文献

- [1] 王长路, 王伟功, 张立勇, 等. 中国风电产业发展分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2015, 38(1): 148-154.
WANG Chonglu, WANG Weigong, ZHANG Liyong, et al. The analysis of China wind power industry[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2015, 38(1): 148-154.
- [2] 贺益康, 胡家兵. 双馈异步风力发电机并网运行中的几个热点问题[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27): 1-15.
HE Yikang, HU Jiabing. Several hot-spot issues associated with the grid-connected operations of wind-turbine driven doubly fed induction generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(27): 1-15.
- [3] WANG Zhan, NIAN Heng, HU Jiabing. Enhanced control strategies of permanent magnet synchronous wind power generation system under unbalanced grid voltage conditions[C] // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference: IEEE, 2010: 1-4.
- [4] 姚骏, 陈西寅, 廖勇, 等. 电网电压不平衡时永磁直驱风电机组的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 99-106.
YAO Jun, CHEN Xiyin, LIAO Yong, et al. Control strategy of a direct-driven permanent-magnet synchronous generator wind turbine under unbalanced grid voltage conditions[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 99-106.
- [5] 朱晓荣, 刘世鹏, 张海宁, 等. 不平衡电网电压下光伏并网逆变器滑模直接电压/功率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 133-140.
ZHU Xiaorong, LIU Shipeng, ZHANG Haining, et al. Sliding mode control based direct voltage/power control strategy for PV grid connected inverter under unbalanced grid voltage[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 133-140.
- [6] 姚骏, 陈西寅, 廖勇, 等. 抑制负序和谐波电流的永磁直驱风电系统并网控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 29-35.
YAO Jun, CHEN Xiyin, LIAO Yong, et al. A grid-connection control strategy to suppress negative-sequence and harmonic currents for permanent magnet direct-driven wind power generation system[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 29-35.
- [7] 高骏, 王磊, 周文, 等. 双馈风电机组电网背景谐波运行与谐波抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 164-169.
GAO Jun, WANG Lei, ZHOU Wen, et al. Study on operating behavior and suppression strategy of doubly-fed induction generators wind turbine under harmonic grid voltage conditions[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 164-169.
- [8] 田鹏, 宣文华, 牛益国. 基于陷波控制的 LCL 型光伏并网逆变器谐波抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 82-88.
TIAN Peng, XUAN Wenhua, NIU Yiguo. Suppression of harmonic resonance for photovoltaic grid-connected inverter with LCL filter based on notch filter control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 82-88.
- [9] NG C H, RAN L, BUMBY J. Unbalanced-grid-fault ride-through control for a wind turbine inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(3): 845-856.
- [10] 程航, 曹五顺, 周明星. 不对称电网电压条件下直驱永磁风力发电机组并网逆变器的双电流闭环控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 66-72.
CHENG Hang, CAO Wushun, ZHOU Mingxing. Research on dual current-loop control strategy for grid-connected inverter of directly-driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator under unbalanced network voltage conditions[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 66-72.
- [11] 张兴, 季建强, 张崇巍, 等. 基于内模控制的三相电压型 PWM 整流器不平衡控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 51-56.
ZHANG Xing, JI Jianqiang, ZHANG Chongwei, et al. Study of internal model control based three-phase PWM rectifier under unbalanced input voltage condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 51-56.
- [12] 苑晓垚, 荆龙, 梁建钢, 等. 基于比例谐振调节器的 PWM 整流器不平衡控制[J]. 电力电子技术, 2015, 49(1): 6-8.
YUAN Xiaoyao, JING Long, LIANG Jianguang, et al. Unbalanced control of PWM rectifiers based on proportional resonant regulator[J]. Power Electronics,

- 2015, 49(1): 6-8.
- [13] TEODORESCU R, BLAABJERG F, LISERRE M, et al. Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2006, 153(5): 750-762.
- [14] 操丰梅, 朱喆, 张效宇, 等. VSC-HVDC 中直流换流器的比例积分-准谐振-重复控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 968-975.
CAO Fengmei, ZHU Zhe, ZHANG Xiaoyu, et al. Proportional integral-quasi-resonant-repetitive control strategy for VSC of VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 968-975.
- [15] 黄挚雄, 徐保友, 沈玲菲, 等. LCL 并网逆变器新型电流双闭环控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 1-5.
HUANG Zhixiong, XU Baoyou, SHEN Lingfei, et al. New current double closed loop control strategy of LCL grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 1-5.
- [16] 王斯然, 吕征宇. LCL 型并网逆变器中重复控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 69-75.
WANG Siran, LÜ Zhengyu. Research on repetitive control method applied to grid-connected inverter with LCL filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(27): 69-75.
- [17] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126.
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126.
- [18] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [19] 赵清林, 郭小强, 邬伟扬. 单相逆变器并网控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 60-64.
ZHAO Qinglin, GUO Xiaoqiang, WU Weiyang. Research on control strategy for single-phase grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 60-64.
- [20] 张兴, 汪杨俊, 余畅舟, 等. LCL 并网逆变器改进型重复控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 101-107.
ZHANG Xing, WANG Yangjun, YU Changzhou, et al. An improved repetitive control strategy for grid-connected inverters with LCL filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 101-107.
- [21] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.

收稿日期: 2017-04-13; 修回日期: 2017-07-13

作者简介:

徐红灿(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制、风电并网等; E-mail: hongcansu@163.com

滕予非(1984—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: yfteng2011@163.com

王晓茹(1962—), 女, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为动态电力系统分析、含大规模可再生能源的电力系统的保护与控制等。E-mail: x_r_wang@163.com

(编辑 魏小丽)