

基于电压控制型双馈风电机组控制策略综述

林鑫,高翔,谢震,许可宝,张兴

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院,安徽 合肥 230009)

摘要:随着风电装机容量的不断提升,高比例风电接入加剧了电网的低惯量、弱阻尼等特性,给电网安全稳定运行带来了严峻挑战。传统电流控制型策略因采用锁相环而难以在弱电网中获得准确的电网同步信息,而基于电压控制构建功率平衡方程获取同步角度,在弱电网下具有良好的运行性能。为此,首先以外环同步方式和内环控制结构分类研究电压控制型的结构变形;然后针对弱电网场景,结合阻抗/导纳建模对电压控制型弱网稳定性进行分析,提出在复杂电网场景下抑制中高频振荡策略;同时介绍了大功率电压控制型双馈风电机组在现场运行测试情况;最后指出了电压控制型发展方向,为后续研究提供参考。

关键词:弱电网;电压控制型;同步方式;阻抗建模;谐振抑制

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed24423

Review on Control Strategies of VC-DFIG

LIN Xin, GAO Xiang, XIE Zhen, XU Kebao, ZHANG Xing

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology,
Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: With the increasing proportion of wind turbines, the characteristics of low inertia and weak damping of power grid become more obvious, which brings new challenges to the smooth operation of power grid. Traditional current-controlled strategy is difficult to obtain accurate grid synchronization information in weak power grid by using phase-locked loop. Based on voltage-controlled, power balance equation is constructed to obtain synchronization angle, which has good operation performance in weak power grid. For this reason, firstly, the outer loop synchronous mode and the inner loop control structure were classified to study the voltage-controlled structural deformation. Then, for the weak power grid scenario, the impedance/admittance modeling was combined to analyze the stability of the voltage-controlled weak power grid. And the strategy of suppressing medium-high frequency oscillation in the complex power grid scenario was proposed. At the same time, the field operation test of high-power voltage-controlled doubly-fed induction generations (DFIG) was introduced. Finally, the development direction of voltage-controlled was pointed out to provide reference for the follow-up research.

Key words: weak power grid; voltage-controlled (VC); synchronous mode; impedance modeling; harmonic suppression

随着我国风电技术水平和风电装机总量不断提高,风力发电已成为实现“双碳”目标中不可或缺的一环。但风电渗透率的增加,使得风电并网呈现弱电网的特性逐渐明显,如何在弱电网下稳定运行成为目前研究风力发电的一个重点。双馈风力发电机(doubly-fed induction generators, DFIG)因具有良好的控制性、经济性而受到广泛应用。DFIG较多采用经锁相环(phase-locked loop, PLL)同步的传统电流控制型策略(current-controlled DFIG, CC-DFIG),通过锁相环并网之后的并网点电压得到控制所需的角速度信息。在电网

强度较强时,并网点电压能够保持在相对稳定的状态,此时DFIG具有良好的运行性能;当机组处于弱电网环境时,并网点电压存在扰动,该扰动将通过锁相环控制的角度影响变流器的控制输出,对系统稳定性带来恶劣的影响,使得电流控制型的双馈风电机组难以在弱电网下保持稳定^[1]。

对于CC-DFIG的稳定性分析问题目前已有较多文献进行研究。文献[2]通过建立锁相环的动态方程,指出锁相环是影响DFIG功角及其稳定性的关键因素。文献[3]针对风电远距离线路传输时存在的低频功率振荡问题,通过建立锁相

环和DFIG的动态模型,研究机组在不同电网强度下的振荡规律,认为锁相环环节的存在直接导致双馈风电系统在弱电网下无法稳定运行。文献[4]针对DFIG锁相环同步在弱电网下容易失稳的问题,建立简化的小信号模型,发现弱电网下有功率与端电压之间存在的耦合等效于在锁相环中增加正反馈,将进一步对系统的稳定性造成影响。上述文献分析表明,电流控制型中锁相环的结构使得双馈风电机组无法在弱电网下稳定运行。虽然可以通过调节控制器参数提高稳定性^[5-6],但会给系统的动态性能带来负面的影响,并且作用有限,调节范围、调节方向等问题有待进一步研究。

近年来电压控制型DFIG(voltage-controlled DFIG, VC-DFIG)由于不需要经过锁相环进行同步,在弱电网下具有一定的优势,受到广泛关注。VC-DFIG在其控制策略中运用虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)的数学模型,通过虚拟同步控制模拟同步电机的机械运动特性,得到输出相位信息,并用该角度代替锁相环的作用,从而减小弱电网下锁相环引入的扰动影响^[7-8]。文献[9]分析了传统矢量控制与虚拟同步控制在DFIG控制上的差异,结果表明:在弱电网下传统矢量控制存在最大输出功率受限问题;而采用虚拟同步控制的输出功率不受限制,且能够提供系统所需的惯性,从而提高电网频率的稳定性。文献[10-11]模拟了基于虚拟同步控制的DFIG在弱电网下的运行状况,发现并网点电压在受到负荷冲击时能够维持电压的恒定,同时还具备在电网频率变化时提供暂态支撑的能力。文献[12]分析研究了虚拟同步控制策略的技术关键点,解释了采用虚拟同步控制的转子与电机转子之间的能量平衡关系。文献[13]提出在同步中加入辅助阻尼控制,可以提高同步稳定性和小信号稳定性。

从文献[9-13]分析可知,弱电网下采用功率同步的控制方式相较于基于锁相环同步控制的稳定性更好,但其在并网时存在一些问题仍需要改进^[14-18]。文献[14]针对并网时并网点电压可能存在相位和幅值与电网不一致现象,提出不需要采用锁相环的预同步控制策略。文献[15]采用一种自适应虚拟阻抗控制策略,解决了弱电网下系统存在的功率耦合问题。文献[16-17]针对电网电压不平衡时二倍频波动影响稳定性的问题,提

出二阶广义积分器对二倍频进行控制,实现电子电流平衡以及输出功率的恒定。文献[18]提出在对称电网故障下虚拟同步控制双馈风电机组的故障穿越策略,提高了机组在对称电网故障下的运行性能和容错能力。

在目前的研究中,针对电压控制型策略及研究缺少较为系统的总结分析。本文将基于不同的同步方式策略介绍目前较为常用的电压控制型结构,并对电压控制型稳定性分析中采用的阻抗建模关键步骤进行分析说明;针对电压控制型存在的并入并联补偿弱电网时存在的谐振现象提出抑制策略,并基于实验平台对电压控制型的双馈平台进行验证分析;最后对未来的电压控制型研究方向及重点进行展望与总结。

1 电压控制型双馈风电机组控制结构

1.1 同步方式定义

1.1.1 功率同步方式

在VC-DFIG的虚拟同步控制结构中,所采用的同步方式多为功率与转矩同步方式。功率同步方式通过有功功率环输出同步角度,并将该角度运用到 dq 控制结构中,无功功率环根据输出功率与端电压之间存在的下垂关系得到输出电压的幅值信息。采用的控制策略均是通过模拟同步发电机特性,以获得类似的阻尼特性和惯性。

有功和无功功率环的控制方程为

$$P_{\text{ref}} - P_s - D(\omega - \omega_0) = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

$$\theta_r = \int (\omega - \omega_r) dt \quad (2)$$

$$u_{r,\text{ref}} = K_p(Q_{\text{ref}} - Q_s) + K_i \int (Q_{\text{ref}} - Q_s) dt \quad (3)$$

式中: P_{ref} 为定子侧输出有功功率的参考值; P_s 为定子侧输出有功功率测量值; Q_{ref} 为定子侧输出无功功率的参考值; Q_s 为定子侧输出无功功率测量值; J 为虚拟惯性时间常数; D 为虚拟阻尼系数; $\omega, \omega_0, \omega_r$ 分别为虚拟角频率、额定角频率、转子转速; θ_r 为转子参考电压的相角; $u_{r,\text{ref}}$ 为转子参考电压的给定值; K_p, K_i 分别为无功环比例、积分系数。

文献[9]采用基于虚拟同步控制的功率环,有功功率环路控制虚拟同步频率,无功功率环路控制电压幅值,内电势指令由频率和幅值经过同步方程合成得到。该控制结构只含有单一的功率环,其控制框图如图1所示。图中, ω_b 为角速度基准值, $u_{\text{rabc}}^{\text{ref}}$ 为转子励磁电压的参考值。

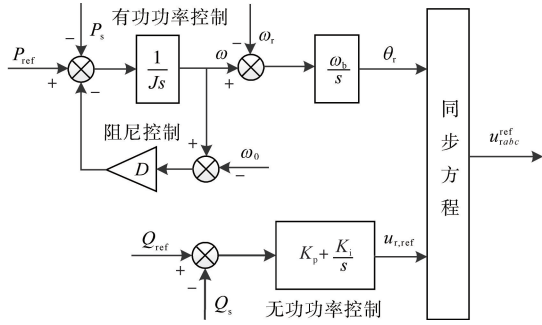


图1 功率同步方式下的虚拟同步控制框图

Fig.1 Virtual synchronization control block diagram under power synchronization mode

1.1.2 转矩同步方式

转矩同步方式通过虚拟同步转轴提供频率支撑和虚拟的惯量特性,并实现电网同步,本质上也是对同步发电机特性的模拟。控制方程为

$$T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) = J \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

式中: T_m 为虚拟机械转矩给定值; T_e 为电磁转矩。

文献[19-20]均采用转矩同步方式进行同步控制。不同的是,文献[19]的励磁部分采用转子电压闭环的控制方式,得到励磁电流后结合虚拟角频率获得转子内电势幅值指令,其基本控制结构如图2a所示。图中, u_r^{ref} , u_s 分别为转子电压的参考值和测量值, L_{fv} 为定子与虚拟励磁绕组互感最大值, i_{fv} 为虚拟励磁电流矢量。而文献[20]则是通过转子磁链的闭环控制实现励磁控制,使得内电势保持稳定,其控制方程为

$$\begin{cases} u_r^* = \Delta u_r + K_{p\psi}(\Psi_{r,ref} - \Psi_r) + K_{i\psi} \int (\Psi_{r,ref} - \Psi_r) dt \\ \Delta u_r = j(\omega - \omega_r) \Psi_r + \frac{L_m}{T_r L_s} \Psi_s \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$T_r = \sigma L_r / R_r \\ \sigma = (1 - L_m^2) / (L_s L_r)$$

式中: $K_{p\psi}$, $K_{i\psi}$ 分别为磁链调节器 $H_\psi(s)$ 的比例、积分系数; T_r 为转子暂态时间常数; R_r 为转子电阻; L_r , L_s 分别为转子自感和定子自感; L_m 为定转子互感; σ 为漏感系数; Δu_r 为解耦项。

u_r^* 为虚拟励磁电压指令,由于励磁控制回路的虚构性,故还需通过指令 $e^{j(\theta_s - \theta_r)}$ 将其转换到实际的转子坐标系下,以得到转子参考电压的给定值。

此外,文献[20]在同步控制环内附加一个辅助控制环,其控制结构如图2b所示。图中, θ_0 为电网电压相角; $G_{syn}(s)$ 用于完成并网前的相角同

步,采用PI控制; $G_d(s)$ 用于抑制双馈电机的轴系扭振,控制方程为

$$G_d(s) = \frac{K_d T_d s}{T_d s + 1} \quad (6)$$

式中: K_d 为轴系阻尼增益; T_d 为滤波器截止时间常数。

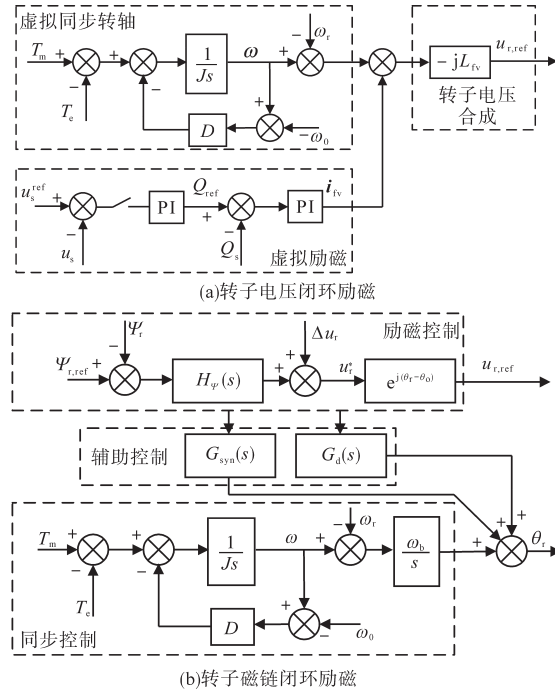


图2 转矩同步方式下的虚拟同步控制框图

Fig.2 Virtual synchronization control block diagram under torque synchronization mode

1.2 电压控制型内环结构划分

在1.1.2节中介绍了转矩同步方式下的两种不同的控制结构。同样,在功率同步方式下也能根据有无内环和内外环结构的不同将其划分为多种形式。

1.2.1 单功率环结构

图1所示的控制结构只含有单一的功率环,为最基础的功率同步控制方式,文献[9,21-22]均采用该结构。

1.2.2 功率外环+双PI内环结构

文献[15]在目前的功率环控制的基础上,加入双PI内环控制,并对有功环附加虚拟角速度调节。外环采用VSG控制策略,内环采用双馈电机定子电压、转子电流双PI闭环控制结构,能够较好地稳定定子电压,在弱网下具有良好的运行特性,其基本控制结构如图3所示。图中, K_ω 为虚拟调速系数; E_0 为额定电压; n_q 为无功下垂系数; u_{sd} , u_{sq} 分别为定子 d , q 轴电压; u_{rd} , u_{rq} 分别为转子 d , q 轴电压; i_{rd}^* , i_{rq}^* 分别为转子 d , q 轴电流指令值。

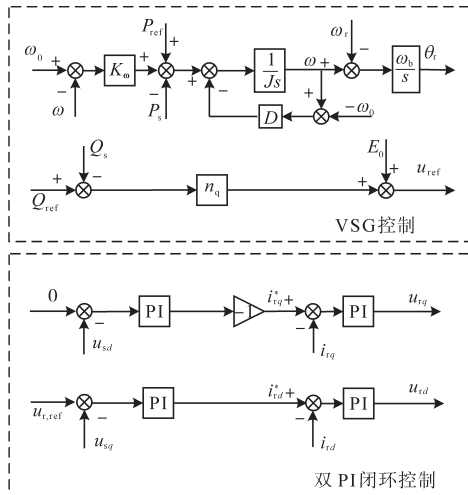


图3 含PI控制内环的电压控制型控制框图

Fig.3 Voltage-controlled control block diagram with PI control inner loop

1.2.3 无功功率环+虚拟阻抗结构

由于参与电网并网缺少锁相环的预同步控制,DFIG定子与电网的电压幅值和初始时刻相位可能存在一定的偏差。文献[14]提出一种在无功功率控制外环上附加虚拟阻抗的策略,实现了双馈风电机组快速平滑并网。以输出虚拟电流 $i_{abc,ref}$ 作闭环参考电流,其控制方程为

$$i_{abc,ref} = \frac{1}{L_v s + R_v} (E_{abc} - u_{s,abc}) \quad (7)$$

式中: L_v 为虚拟电感; R_v 为虚拟阻抗; $u_{s,abc}$ 为定子的三相电压; E_{abc} 为无功-电压环的输出电压。该控制采用转子电流外环、转子电压内环的双环结构,并将定子电压作为前馈补偿项,能够实现双馈电机的快速平滑并网,其控制结构如图4所示。

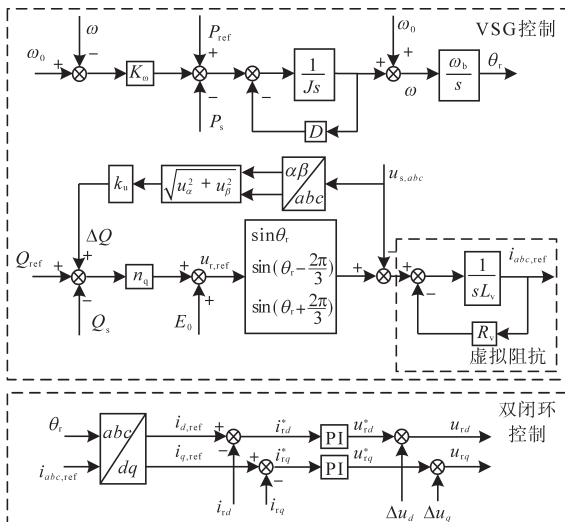


图4 附加虚拟阻抗策略的电压控制型控制框图

Fig.4 Voltage-controlled control block diagram with virtual impedance strategy

1.2.4 三种不同有功功率控制结构

文献[23]讨论了三种不同的有功功率控制方案,分别为:一阶转矩方程(1st-OTE)控制方式、PI控制方式和超前滞后(LL)控制方式。有功功率控制的数学模型如图5所示。图中, E, V 分别为电动势与电网电压的均方根, X 为线路阻抗。

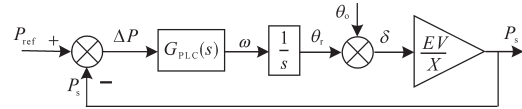


图5 有功功率控制的数学模型

Fig.5 Mathematical model of the active power control

1) 1st-OTE控制方式下,有功回路控制器的控制方程为

$$G_{PLC}(s) = \frac{1}{\omega(Js + D)} \quad (8)$$

该控制方式与前文相同,在此不再赘述。

2) 常用的PI控制器也可以作为有功功率控制实现的方案,其有功回路控制器的控制方程为

$$G_{PLC}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (9)$$

在电网频率发生变化时,PI调节能使输出功率在稳定状态下等于参考值。该方式无需使用额外的下垂控制环就能精确地实现功率跟踪控制,这使得外部下垂控制器的参数设置更加简单直观。通过适当设置PI控制器增益,同样可以保证系统所需的惯性和阻尼特性。

3) LL控制是在1st-OTE控制方式的基础上,通过增加下垂分支来控制稳态下的 $P-f$ 下垂增益。该控制方式通过引入一个新的自由度 K_G 来调整功率传递函数的偏移量,其有功回路控制器的控制方程为

$$G_{PLC}(s) = \frac{K_p s + K_I}{s + K_G} \quad (10)$$

与1st-OTE控制方式相比,LL控制方式在不增加功率调节传递函数阶数的情况下提供了一个额外的自由度,并且还具有内置的 $P-f$ 下垂特性,可以独立于惯性和阻尼参数设置。

2 弱网下VC-DFIG稳定性分析

弱电网下双馈风力发电机组的稳定性问题是目前研究的一个重点。VC-DFIG采用基于功率同步的方式能够有效地减小锁相环同步所带来的影响,使其在弱电网下运行具有一定的优势。

2.1 VC-DFIG建模

2.1.1 dq导纳建模

对于控制框图1的VC-DFIG在dq导纳建模过程中主要考虑功率环和电机本体的模型,经过小信号线性化后得到定子端电流和电压之间的导纳关系。

以 Δ 代表对应参数的小信号变化量,功率环小信号化如下式所示:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_r \\ \Delta u_r \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\omega_0}{s(Js + D)} & 0 \\ 0 & K_p + \frac{K_I}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_s \\ \Delta Q_s \end{bmatrix} \quad (11)$$

根据同步方程可以得到转子电压d,q轴分量如下:

$$\begin{cases} u_{rd} = u_r \cos\theta_r \\ u_{rq} = u_r \sin\theta_r \end{cases} \quad (12)$$

将转子电压小信号化得到转子电压与功率环之间的关系:

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{rd} \\ \Delta u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -u_{r0} \sin\theta_{r0} & \cos\theta_{r0} \\ u_{r0} \cos\theta_{r0} & \sin\theta_{r0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_r \\ \Delta u_r \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: θ_{r0} 为转子参考电压相角在工作点的稳态值。

联立双馈电机小信号方程^[14],得到输出阻抗表达式为

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{sd} \\ \Delta u_{sq} \end{bmatrix} = -Z_{out} \begin{bmatrix} \Delta i_{sd} \\ \Delta i_{sq} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{dd} & Z_{dq} \\ Z_{qd} & Z_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{sd} \\ \Delta i_{sq} \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.1.2 序阻抗建模

对于控制框图3采用基于谐波线性化建模方式得到序阻抗模型,在建模过程中主要考虑功率环、定子电压环、转子电流环以及双馈电机本体模型^[24-25]。

定义并网点电压和转子电流在频域中的表达式如下:

$$u_a[f] = \begin{cases} V_1 = 0.5V_{s1} e^{\pm j\varphi_{v1}} & f = \pm f_1 \\ V_p = 0.5V_{sp} e^{\pm j\varphi_{vp}} & f = \pm f_p \end{cases} \quad (15)$$

$$i_{ra}[f] = \begin{cases} I_{r1} = 0.5I_{r1} e^{\pm j\varphi_{ir1}} & f = \pm(f_1 - f_i) = \pm f_s \\ I_{rp} = 0.5I_{rp} e^{\pm j\varphi_{irp}} & f = \pm(f_p - f_i) \end{cases} \quad (16)$$

式中: V_{s1}, φ_{v1} 分别为定子电压基频幅值和相位; V_{sp}, φ_{vp} 分别为正序扰动电压幅值和相位; I_{r1}, φ_{ir1} 分别为转子电流基频幅值和相位; I_{rp}, φ_{irp} 分别为转子正序扰动电流幅值和相位; f_x 为对应情况下的频率; V_1, V_p, I_{r1}, I_{rp} 为指定频率下的复数值。

定子侧输出功率在频域中的表达式如下式:

$$P_s[f] = \begin{cases} 3(V_{s1} I_{s1}^* + V_{s1}^* I_{s1}) & DC \\ 3(V_{sp} I_{s1}^* + V_{s1}^* I_{sp}) & f = \pm(f_p - f_1) \end{cases} \quad (17)$$

$$Q_s[f] = \begin{cases} 3j(-V_1 I_{s1}^* + V_1^* I_{s1}) & DC \\ 3j(\mp V_p I_{s1}^* - V_1^* I_{sp}) & f = \pm(f_p - f_1) \end{cases} \quad (18)$$

式中: I_{s1} 为定子电流基频分量复数值; I_{sp} 为定子正序扰动电流复数值;上标“*”表示复数的共轭;DC表示直流情况。

根据功率环得到的角度和电压小信号分量在频域中的表达式如下式:

$$\Delta\theta_s[f] = -3m_p(s)(V_p I_{s1}^* + V_1^* I_{sp}) \quad f = \pm(f_p - f_1) \quad (19)$$

$$\Delta u_{ref}[f] = -3jn(\mp V_p I_{s1}^* \pm V_1^* I_{sp}) \quad f = \pm(f_p - f_1) \quad (20)$$

其中 $m_p(s) = 1/(sD + J\omega_0 s^2)$

式中: n 为电机转速。

功率环输出的角度扰动和幅值扰动将通过d,q轴分量传递到定子电压环和转子电流环的控制中。经过内环得到的转子电压d,q轴频域分量表达式如下式:

$$u_{rd}[f] = H_{ir}(s) \{ [-3jn(\mp V_p I_{s1}^* \pm V_1^* I_{sp}) - V_p + 3m_p(s)(V_p I_{s1}^* + V_1^* I_{sp})V_1 \sin\varphi_{v1}] H_{us}(s) + 3m_p(s)(V_p I_{s1}^* + V_1^* I_{sp})I_{r1} \sin\varphi_{ir1} - I_{rp} \} \quad f = \pm(f_p - f_1) \quad (21)$$

$$u_{rq}[f] = H_{ir}(s) \{ [-3m_p(s)(V_p I_{s1}^* + V_1^* I_{sp})V_1 \cos\varphi_{v1} \pm jV_p] H_{us}(s) - 3m_p(s)(V_p I_{s1}^* + V_1^* I_{sp}) \cdot I_{r1} \cos\varphi_{ir1} \pm jI_{rp} \} \quad f = \pm(f_p - f_1) \quad (22)$$

式中: $H_{us}(s), H_{ir}(s)$ 分别为定子电压环和转子电流环PI参数。

最终联立双馈电机序阻抗模型,得到并网点电压和定子电流的序阻抗关系。

2.2 输出阻抗分析

对于控制框图3采用序阻抗建模得到的输出正序阻抗波特图如图6所示,图中实线和星号线分别为VC-DFIG输出正序阻抗波特图和扫频验证图。VC-DFIG正序输出阻抗幅值整体上呈现上升趋势,在基频以下部分增长趋势较明显,基频以上部分幅值增长较为缓慢。VC-DFIG输出正序阻抗的相位在20 Hz以下呈现负阻特性,在50 Hz以上相位逐渐呈现阻感特性,且相位呈现增加趋势,高频段的相位将达到90°以上。在通过阻抗对系统的稳定性进行分析中发现,双馈子

系统和电网子系统存在幅值相交点时,该点为可能发生谐振点。若该频率点所对应的相位差达到180°,则系统极易在该点发生谐振现象。可见对于串补电网和并补电网而言,系统极易在20 Hz以下和1 kHz以上频段产生谐振现象。

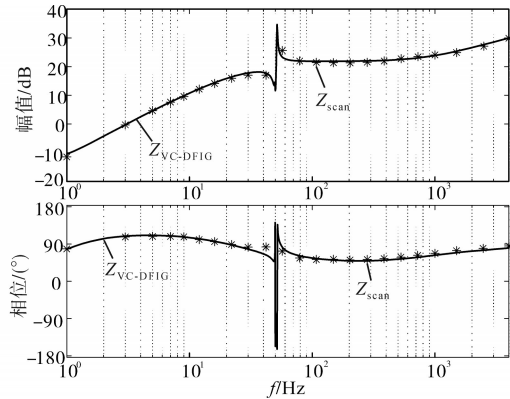


图6 VC-DFIG输出正序阻抗波特图
Fig.6 VC-DFIG outputs positive sequence impedance Bode diagram

2.3 弱网下VC-DFIG中高频谐振抑制

由2.2节的阻抗分析可知,VC-DFIG在接入并联补偿弱电网时易产生中高频谐振,为系统的运行带来不利影响。在目前的谐振抑制问题研究中,大多采用附加阻尼控制策略,通过重塑输出阻抗,使得可能发生谐振点所对应的相位差减小到180°以下,从而使系统避免产生谐振现象,提高稳定性。

在控制框图3的转子电流环中加入附加阻尼控制策略,控制结构如图7所示。其中, ω_c 为高通滤波器的截止频率, K_f 为阻尼系数。

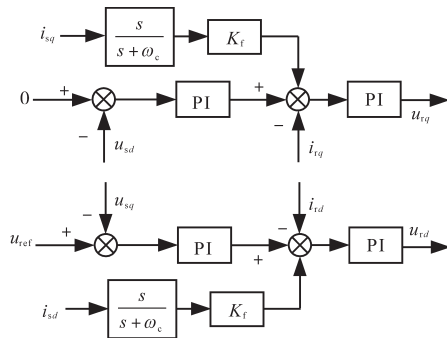


图7 附加阻尼控制策略
Fig.7 Additional damping control strategy

该策略在转子电流环引入定子电流d,q轴反馈分量,并通过高通滤波器滤除反馈分量中的低频部分,再与转子电流环输入进行比较。运用阻抗法对加入谐振抑制策略之后的VC-DFIG输出阻抗进行建模,其输出正序阻抗表达式如下:

$$A_{pz} = -G_{IPF}(s \mp j2\pi f_1)H_{ir}(s \mp j2\pi f_1) \cdot [1 \pm j3m_p(s \mp j2\pi f_1)V_1^* I_{s1}] \quad (23)$$

$$A_{pm} = \pm j3G_{IPF}(s \mp j2\pi f_1)H_{ir}(s \mp j2\pi f_1) \cdot m_p(s \mp j2\pi f_1)I_{s1}^* I_{s1} \quad (24)$$

其中 $G_{IPF}(s) = K_f s / (s + \omega_c)$
式中: A_{pz}, A_{pm} 分别为正序分量的分子和分母增加的部分; $G_{IPF}(s)$ 为附加阻尼控制策略等效传递函数。

图8为加入谐振抑制策略后VC-DFIG输出正序阻抗波特图。在未加入谐振抑制策略时,电网子系统与VC-DFIG子系统输出阻抗幅值交于A点,此时相位差大于180°,系统极易产生1 kHz以上的谐振现象。当加入谐振抑制策略之后,VC-DFIG输出阻抗幅值曲线上移,可能发生的谐振点也随之上移,相位曲线逐渐减小,且随着阻尼系数的变化,相位曲线下移得更多。选择合适的阻尼系数后,即图中的B点,该点对应的相位差明显小于180°,且留有一定的裕度,系统处于稳定状态,采用附加阻尼控制策略能够有效抑制谐振的产生。

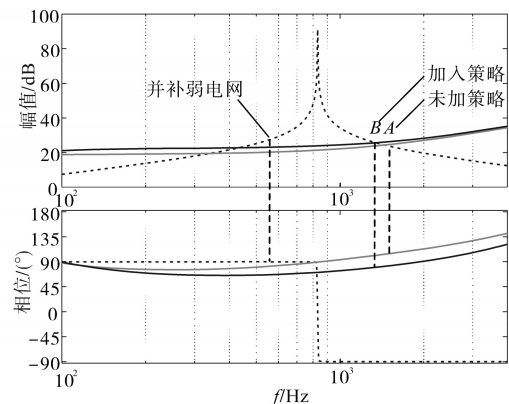


图8 加入谐振抑制策略后VC-DFIG输出正序阻抗波特图
Fig.8 VC-DFIG outputs positive sequence impedance diagram after adding resonance suppression strategy

3 电压控制型双馈风电机组的应用

为了在现场实际风况不断变化条件下测试相关策略的可行性及稳定性,电压控制型大功率双馈风电机组目前已经在风电基地进行了正常启机、并网运行、功率加载等相关测试,进一步验证了电压控制型双馈风电机组走向产品化道路的可靠性。图9为电压控制型双馈风电机组在张北风电实验基地现场运行测试照片。主控通过CAN与变流器进行数据及相关控制指令传输,变

流器实时响应主控的指令。相关波形数据可通过上位机实时数字示波器进行观测。



图9 电压控制型双馈风电机组现场测试照片
Fig.9 VC-DFIG field test photos

双馈风电机组通过四级升压系统与远端500 kV电网相连,模拟弱网所用阻抗串联在35 kV侧。通过开关切换在线路中串入不同阻抗 Z_L ,从而模拟不同短路比下的弱电网场景。双馈电机参数为:转子开路电压1 935 V,额定电压690 V,定子电阻 $0.001\ 585\ \Omega$,转子电阻 $0.001\ 092\ \Omega$,定子电感 $3.8e-5\ H$,转子电感 $2.1e-4\ H$,额定转速1 200 r/min,额定功率2 550 kW,额定风速11.5 m/s,机组型号WD107-2500。在切入风速为3 m/s,切出风速为25 m/s的情况下进行现场测试。

电压控制型风电机组励磁启动与相位同步过程如图10所示,1.5 s左右开始励磁。电压控制型双馈风电机组预同步策略包括两个部分,分别是对定子端电压幅值和相位的同步。由于电网电压幅值基本保持不变,因此对定子端电压幅值的同步相对容易,可通过 d 轴电压环调节输出励磁电流建立励磁电压。定子电压相位的同步基

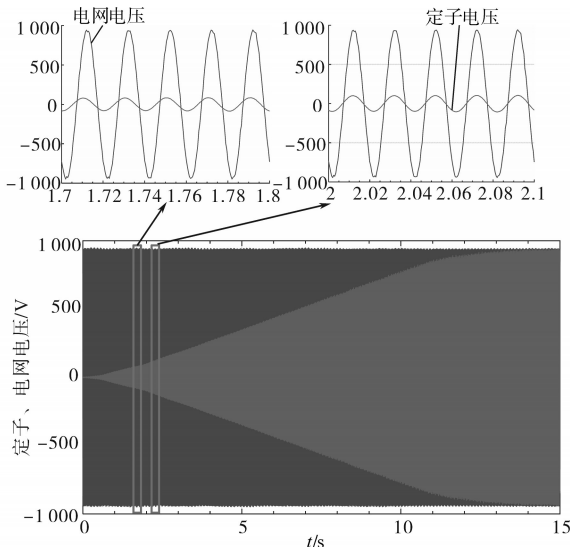


图10 电压控制型双馈风机励磁相位同步过程

Fig.10 Excitation phase synchronization process of VC-DFIG
10

于电压矢量定向的原理,在电压 q 轴定向的前提下,根据电网电压矢量的相位将定子电压变换至两相同步旋转坐标系。若此时存在相位差,则定子电压的 d 轴分量不为零。将该分量作为偏差扰动,经过PI调节器叠加在有功环节的输出频率上,则可将相位偏差转换为频率偏差的形式。这样,通过不同旋转角速度的作用,电压之间的相位差逐渐减小至零,此时就达到了相位同步的效果。从图10细节放大图可以看出,1.7~1.8 s相位还未完全同步,2~2.1 s相位已经完全同步,在励磁电压建立的过程就完成了相位同步,整个励磁过程运行平滑,励磁电压建立过程无超调。

图11表示在大风时,机组持续运行在最大功率2.55 MW的功率波形。由于机组主控制器以转速闭环控制,限功率运行时仍然有小幅功率波动,在此过程中机组变流器控制始终能平滑快速跟踪主控功率指令变化,并长时间稳定运行。无功功率在此过程中波动很小,电压控制型双馈风电机组系统满足电网电能质量要求。

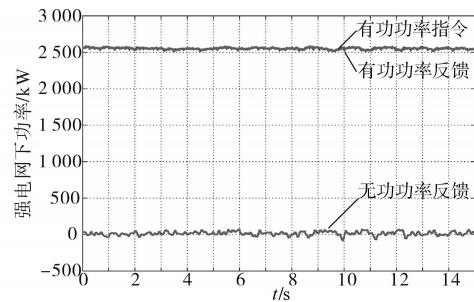


图11 功率跟踪过程

Fig.11 Power tracking process

图12为定、转子的电流波形。定子电流频率与电网频率相同,为50 Hz;转子电流频率为10 Hz,转子转速为1 200 r/min。定、转子电流运行相对平滑,无明显畸变,满足并网谐波要求。

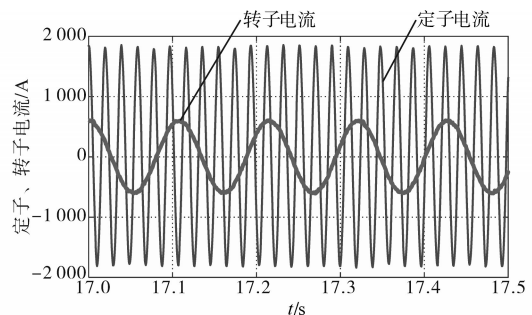


图12 定子和转子电流波形

Fig.12 Waveforms of stator and rotor current

图13为弱电网短路比为1.5时的功率加载波形。随着电网强度变弱,电压控制型风电机组有功加载过程中,为了保证并网点电压恒定,需要

补偿一定无功功率。电压控制型策略在弱电网下具有电压控制环,因此能自发补偿无功,维持端电压恒定。

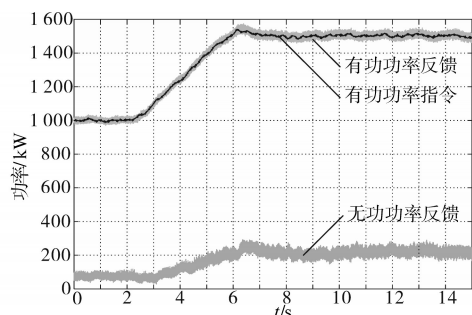


图13 弱电网下有功加载波形

Fig.13 Active power loading waveform in weak current network

4 电压控制型双馈风电机组的未来研究课题

电压控制型双馈风电机组相比于传统电流控制型在弱电网场景下具有一定优势。本文对电压控制型双馈风电机组同步方式和内环控制结构以及阻抗/导纳建模进行了相关的归纳、总结、研究,形成综述,以为后续相关研究提供一定参考。

现有的双馈风力发电机组电压控制型技术仍然不能避免其有功、无功功率在动态过程中存在的耦合问题,当两种功率环的控制目标不同时,控制效果定会受到耦合的影响。因此,有功、无功功率的完全解耦控制也需要进行深入研究。此外,目前控制策略的侧重点主要在于机侧变流器控制,如何充分发挥网侧变流器的控制效能也值得后续探讨研究。

参考文献

[1] 张学广,马彦,王天一,等.弱电网下双馈发电机输入导纳建模及稳定性分析[J].中国电机工程学报,2017,37(5):1507-1515.
Zhang Xueguang, Ma Yan, Wang Tianyi, *et al.* Modeling and stability analysis of input admittance of doubly-fed generator under weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1507-1515.

[2] 王清,毕天姝,薛安成.基于相似性的双馈风机小干扰稳定性分析及锁相环的影响[J].电力系统自动化,2016,40(6):30-34.
Wang Qing, Bi Tianshu, Xue Ancheng. Similarity-based small disturbance stability analysis of doubly-fed wind turbines and the effect of phase-locked loop[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 30-34.

[3] Liu J, Yao W, Wen J, *et al.* Impact of power grid strength and

PLL parameters on stability of grid-connected DFIG wind farm [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 545-557.

- [4] 潘尔生,王智冬,王栋,等.基于锁相环同步控制的双馈风机弱电网接入稳定性分析[J].高电压技术,2020,46(1):170-178.
Pan Ersheng, Wang Zhidong, Wang Dong, *et al.* Stability analysis of weak grid connection for doubly-fed wind turbines based on phase-locked loop synchronous control[J]. High Voltage Technology, 2020, 46(1): 170-178.
- [5] 徐海亮,章玮,贺益康,等.双馈型风电机组低电压穿越技术要点及展望[J].电力系统自动化,2013,37(20):8-15.
Xu Hailiang, Zhang Wei, He Yikang, *et al.* Key points and prospect of low voltage ride-through technology for doubly-fed wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 8-15.
- [6] Cespedes M, Sun J. Adaptive control of grid-connected inverters based on online grid impedance measurements[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 516-523.
- [7] Pogaku N, Prodanovic M, Green T C. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 613-625.
- [8] Brabandere K D, Bolsens B, Keybus J V D, *et al.* A voltage and frequency droop control method for parallel inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1107-1115.
- [9] Wang S, Hu J, Yuan X. Virtual synchronous control for grid connected DFIG-based wind turbines[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 932-944.
- [10] 王磊,张琛,李征,等.双馈风电机组的虚拟同步控制及弱网运行特性分析[J].电力系统保护与控制,2017,45(13):85-90.
Wang Lei, Zhang Chen, Li Zheng, *et al.* Virtual synchronous control of doubly-fed wind turbines and analysis of weak grid operation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 85-90.
- [11] 邵昊舒,蔡旭,周党生,等.风电机组虚拟同步及惯量控制方法分析与测试评估[J].高电压技术,2020,46(5):1528-1537.
Shao Haoshu, Cai Xu, Zhou Dangsheng, *et al.* Analysis and test evaluation of virtual synchronization and inertia control method for wind turbines[J]. High Voltage Technology, 2020, 46(5): 1528-1537.
- [12] 柴建云,赵杨阳,孙旭东,等.虚拟同步发电机技术在风力发电系统中的应用与展望[J].电力系统自动化,2018,42(9):17-25.
Chai Jianyun, Zhao Yangyang, Sun Xudong, *et al.* Application and prospect of virtual synchronous generator technology in wind power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 17-25.
- [13] Huang L, Xin H, Zhang L, *et al.* Synchronization and frequency regulation of DFIG-based wind turbine generators with synchro-

- nized control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3):1251-1262.
- [14] 周鹏,张新燕,邸强,等. 基于虚拟同步机控制的双馈风电机组预同步并网策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14):71-78.
Zhou Peng, Zhang Xinyan, Di Qiang, *et al.* Pre-synchronized grid-connected strategy for doubly-fed wind turbines based on virtual synchronous machine control[J]. Automation of Power Systems, 2020, 44(14):71-78.
- [15] 谢震,孟浩,张兴,等. 基于定子虚拟阻抗的双馈风电机组虚拟同步控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9):157-163.
Xie Zhen, Meng Hao, Zhang Xing, *et al.* Virtual synchronous control strategy of DFIG based on stator virtual impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9):157-163.
- [16] 孙军,蒋天龙,王仰铭,等. 不平衡电网下双馈感应发电机的虚拟同步机控制优化策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10):135-146.
Sun Jun, Jiang Tianlong, Wang Yangming, *et al.* Virtual synchronous machine control optimization strategy for doubly-fed induction generators in unbalanced power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10):135-146.
- [17] 王仰铭,孙丹,年珩,等. 不平衡电网下自同步虚拟同步机拓展功率控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(9):3368-3375.
Wang Yangming, Sun Dan, Nian Heng, *et al.* Research on extended power control strategy of self-synchronizing virtual synchronous machine under unbalanced power grid[J]. Power Grid Technology, 2020, 44(9):3368-3375.
- [18] Wang S, Shang L. Fault ride through strategy of virtual-synchronous-controlled DFIG-based wind turbines under symmetrical grid faults[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(3):1630-1371.
- [19] 程雪坤,孙旭东,柴建云,等. 适用于电网不对称故障的双馈风力发电机虚拟同步控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9):120-126.
Cheng Xuekun, Sun Xudong, Chai Jianyun, *et al.* Virtual synchronous control strategy for doubly-fed wind turbines suitable for grid asymmetric faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9):120-126.
- [20] 张琛,蔡旭,李征. 具有自主电网同步与弱网稳定运行能力的双馈风电机组控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2):476-486.
Zhang Chen, Cai Xu, Li Zheng. A doubly-fed wind turbine control method with autonomous grid synchronization and weak grid stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2):476-486.
- [21] 李辉,王坤,胡玉,等. 双馈风电系统虚拟同步控制的阻抗建模及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12):3434-3443.
Li Hui, Wang Kun, Hu Yu, *et al.* Impedance modeling and stability analysis of virtual synchronous control for doubly-fed wind power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12):3434-3443.
- [22] Wu W, Chen Y, Zhou L, *et al.* Sequence impedance modeling and stability comparative analysis of voltage-controlled VSGs and current-controlled VSGs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8):6460-6472.
- [23] Zhang W, Tarraso A, Rocabert J, *et al.* Frequency support properties of the synchronous power control for grid-connected converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(5):5178-5189.
- [24] 谢震,许可宝,秦世耀,等. 基于电压源型和电流源型双馈风电机组稳定性对比分析[J]. 电网技术, 2021, 45(5):1724-1735.
Xie Zhen, Xu Kebao, Qin Shiyao, *et al.* Comparative analysis of stability of DFIG based on voltage source and current source[J]. Power Grid Technology, 2021, 45(5):1724-1735.
- [25] 谢震,许可宝,高翔,等. 弱电网下基于混合控制型双馈风电机组稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(20):7426-7439.
Xie Zhen, Xu Kebao, Gao Xiang, *et al.* Stability analysis of doubly-fed wind turbines based on hybrid control in weak grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20):7426-7439.

收稿日期:2022-06-15

修改稿日期:2022-07-07