

基于 RSC 反馈线性化的含 SVG 双馈风机系统 次同步振荡抑制^{*}

薛静玮¹, 林毅¹, 唐雨晨¹, 魏鑫¹, 王永杰², 薛安成²

(1. 国网福建省电力有限公司 经济技术研究院, 福建 福州 350012;

2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 针对含静止无功发生器(SVG)的双馈风机(DFIG)系统中的次同步振荡,提出了一种针对转子侧变流器(RSC)的反馈线性化控制方法,并分析验证了其在小/大扰动下的振荡抑制效果。首先,建立了含SVG的双馈系统22阶时域模型;其次,结合反馈线性化原理,针对RSC内环控制设计了相应的控制方法。再次,对比了小扰动下,不同参数变化时,PI控制与反馈线性化控制对系统稳定性的影响。最后,考虑限幅环节作用,分析了大扰动下,系统RSC内环采用PI控制和反馈线性化控制时的稳定性。结果表明,反馈线性化控制能有效增大平衡点的吸引域,提升系统稳定性。

关键词: 双馈风机; 静止无功发生器; 反馈线性化; 特征值分析; 大扰动

中图分类号: TM614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2022)07-0077-10

doi: 10.12177/emca.2022.061

Sub-Synchronous Oscillation Mitigation of DFIG System with SVG Based on RSC Feedback Linearization^{*}

XUE Jingwei¹, LIN Yi¹, TANG Yuchen¹, WEI Xin¹, WANG Yongjie², XUE Ancheng²

(1. Institute of Economic and Technology, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd.,
Fuzhou 350012, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To the sub-synchronous oscillation in the doubly fed induction generator (DFIG) system with static var generator (SVG), a feedback linearization control method for the rotor-side converter (RSC) is proposed, and its oscillation mitigation effect under small/large disturbances is analyzed and verified. Firstly, a 22-order time-domain model of a DFIG system with SVG is established. Secondly, combined with the principle of feedback linearization, the corresponding control method is designed for RSC inner loop control. Thirdly, the effects of PI control and feedback linearization control on the system stability are compared when different parameters change under small disturbance. Finally, considering the effect of the limiting link, the stability of the system RSC inner loop using PI control and feedback linearization control under large disturbance is analyzed. The results show that the feedback linearization control can effectively increase the attraction domain of the equilibrium point and improve the system stability.

Key words: doubly fed induction generator (DFIG); static var generator (SVG); feedback linearization; eigenvalue analysis; large disturbance

收稿日期: 2022-04-22; 收到修改稿日期: 2022-06-07

^{*} 基金项目: 国网福建省电力有限公司科技项目(52130N20000J)

作者简介: 薛静玮(1993—),女,硕士,工程师,研究方向为电力系统优化运行与控制技术。

0 引言

大力发展风能等新能源发电,实现能源供应转型,已成为国内外应对能源问题的共识^[1]。然而,随着高比例风电的接入,电力系统出现了新型次同步振荡^[2],亟需抑制。目前,从控制方法的角度,对含风电的电力系统次同步振荡抑制措施,可以分为附加阻尼控制、优化系统控制以及增设辅助设备三类。

在附加阻尼控制方面,从控制接入的位置看,现有研究大多借助变流器环节实现控制。文献[3-4]通过在双馈风机(DFIG)转子侧变流器(RSC)引入阻尼控制实现次同步振荡抑制。文献[5-6]分别提出了DFIG和直驱风机的电网侧变流器(GSC)附加阻尼控制方法。文献[7]对比了分别在DFIG的RSC与GSC中采用附加阻尼控制时对系统中次同步振荡的抑制效果。而从选取的控制信号看,又可分为转速信号^[8]和电流/电压信号^[9]。在优化系统控制方面,文献[10-11]针对风电场经柔直送出系统进行了参数优化,进而抑制次同步控制相互作用(SSCI)。在增设辅助设备方面,目前大多基于柔性交流输电系统(FACTS)或其他装置,如通过统一潮流控制器^[12]、静止同步串联补偿^[13]和电力系统稳定器^[14-15]实现振荡抑制。

另一方面,从数学的角度看,对于风电次同步振荡抑制的研究对象,主要是负阻尼振荡和光滑的强迫振荡^[16]。其中,针对负阻尼振荡的抑制措施^[17-19]主要通过抵偿控制器中的扰动信号或整定控制参数,进而改善系统平衡点的阻尼,实现对振荡的抑制。而针对光滑的强迫振荡的抑制措施^[20-21]主要通过准确定位并切除扰动源,从而增强系统稳定性。上述研究通过判断局部平衡点的稳定性,针对小扰动下的振荡抑制效果进行了验证。然而在大扰动下,风机内部如限幅等非线性切换环节作用,会使得系统出现与以往不同的切换型振荡^[22-23],目前对该类振荡的抑制鲜见报道。

此外,非线性控制中,通过恰当的坐标变换和状态反馈,将系统化线性系统,从而利用线性控制实现镇定,称之为反馈线性化控制(FLC)。与传统控制方法相比,FLC可在一个足够大的状态

空间中,对非线性系统实现解耦控制,更加适合强非线性强耦合的含静止无功发生器(SVG)双馈系统。然而,现有FLC研究中,较少考虑SVG对系统控制的影响,主要集中于不含SVG的双馈/直驱风机系统^[24-25]。

有鉴于此,本文以含SVG的DFIG系统为研究对象,结合反馈线性化原理,提出了一种针对DFIG RSC的控制方法。首先,推导了含SVG的双馈系统22阶时域模型,并针对转子侧变流器内环进行反馈线性化控制。其次采用特征值法和时域仿真,验证了控制方法在小扰动下的优越性。最后,结合二维相图截面分析了控制方法在大扰动下的有效性。

1 含SVG的DFIG系统时域模型

含SVG的DFIG系统结构如图1所示。大功率DFIG经箱式变压器接入汇流母线,同时,系统中配备有经变压器接入的SVG提供无功支撑。整个风电并网单元经升压变压器和110 kV串补输电线路接入外部电网。下面推导各部分时域状态空间模型。

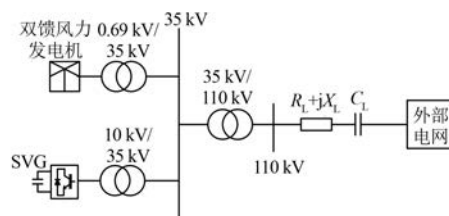


图1 含SVG的双馈风电系统结构图

1.1 DFIG 时域模型

DFIG模型主要包括传动轴、异步发电机、换流器以及外部电路组成。DFIG的机械传动部分采用两质量块模型,如图2所示,即将DFIG的机械部分等效为一个质量块,异步发电机部分等效为另一质量块,二者之间通过传动轴连接。

该部分的微分方程可表示为

$$\begin{cases} 2H_t \frac{d\omega_t}{dt} = T_{in} - K_{tg}\theta_B - D_{tg}(\omega_t - \omega_r) - D_t\omega_t \\ 2H_g \frac{d\omega_r}{dt} = K_{tg}\theta_B + T_{out} + D_{tg}(\omega_t - \omega_r) - D_g\omega_r \\ \frac{d\theta_B}{dt} = \omega_B(\omega_t - \omega_r) \end{cases} \quad (1)$$

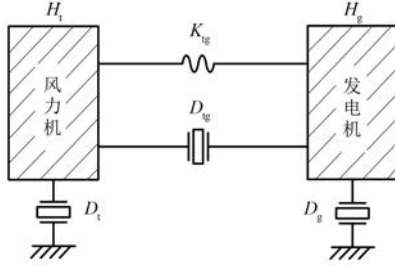


图2 DFIG 两质量块等效模型示意图

式中: H_t 、 H_g 分别为风力机机械部分质量块和异步发电机质量块的惯性系数; ω_t 、 ω_r 分别为风力机机械部分和异步发电机发电转子的角速度; D_t 、 D_g 分别为两质量块的自阻尼系数; D_g 、 K_g 分别为两质量块间的互阻尼系数和刚性系数; θ_B 为等效风力机和发电机转子间的夹角; T_{in} 、 T_{out} 分别为风力机输入机械转矩和发电机输出电磁转矩; $\omega_B = 2\pi f$ 为系统同步角速度。

异步发电机部分可通过 dq 坐标系中的发电机磁链方程与电压方程表示为

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_1 \psi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_1 - \omega_r) \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_1 - \omega_r) \psi_{rd} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ψ_{sd} 、 ψ_{sq} 、 ψ_{rd} 、 ψ_{rq} 分别为定/转子磁链的 d 、 q 轴分量; L_s 、 L_r 分别为定/转子自感抗; L_m 为互感抗; R_s 、 R_r 分别为定/转子电阻; i_{sd} 、 i_{sq} 、 i_{rd} 、 i_{rq} 分别为定/转子电流的 d 、 q 轴分量; u_{sd} 、 u_{sq} 、 u_{rd} 、 u_{rq} 分别为定/转子电压的 d 、 q 轴分量; ω_1 为定子角速度。

本文中, DFIG 的功率解耦控制主要通过转子侧变流器实现, 并忽略直流母线电压的动态过程, 即忽略电网侧变流器的控制作用。同时考虑内环电压限幅, 忽略脉冲宽度调制 (PWM)。转子侧变流器控制框图如图 3 所示。

由控制框图 3 可得其状态方程为

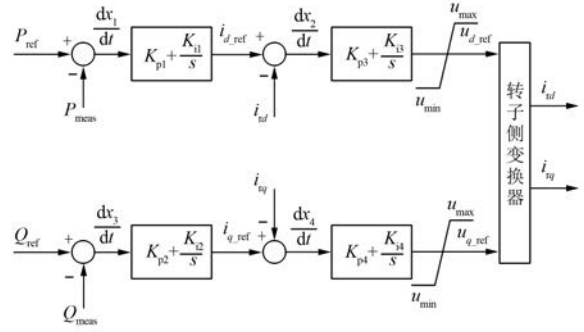


图3 转子侧变流器控制示意图

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = P_{ref} - P_{meas} \\ \frac{dx_2}{dt} = K_{p1} \frac{dx_1}{dt} + K_{i1} x_1 - i_{rd} \\ \frac{dx_3}{dt} = Q_{ref} - Q_{meas} \\ \frac{dx_4}{dt} = K_{p2} \frac{dx_3}{dt} + K_{i2} x_3 - i_{rq} \\ u_{d_ref} = K_{p3} \frac{dx_2}{dt} + K_{i3} x_2 \\ u_{q_ref} = K_{p4} \frac{dx_4}{dt} + K_{i4} x_4 \end{cases} \quad (4)$$

式中: x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 为中间变量; P_{ref} 和 Q_{ref} 分别为有功和无功功率的参考值; P_{meas} 和 Q_{meas} 分别为有功和无功功率的测量值; u_{d_ref} 、 u_{q_ref} 分别为 RSC d 、 q 轴电压参考值; K_{p1} 、 K_{p2} 分别为 RSC d 、 q 轴外环比例系数; K_{p3} 、 K_{p4} 分别为 RSC d 、 q 轴内环比例系数; K_{i1} 、 K_{i2} 分别为 RSC d 、 q 轴外环积分系数; K_{i3} 、 K_{i4} 分别为 RSC d 、 q 轴内环积分系数。

DFIG 外部电路结构如图 4 所示, 采用典型的 RLC 串联结构, 外部电网等值为电压幅值不变的无穷大节点, 变压器和送出线合并考虑, 采用电磁暂态模型。

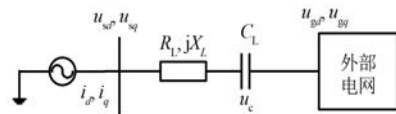


图4 DFIG 外部电路结构图

根据各元件间的电气关系, 可得外部电路结构在 dq 坐标系下的数学模型:

$$\begin{cases} \frac{du_{cd}}{dt} = \omega_B u_{cq} + \omega_B \frac{1}{C_L} i_d \\ \frac{du_{cq}}{dt} = -\omega_B u_{cd} + \omega_B \frac{1}{C_L} i_q \\ \frac{di_d}{dt} = -\omega_B \frac{1}{X_L} u_{cd} - \omega_B \frac{R_L}{X_L} i_d + \omega_B i_q + \omega_B \frac{u_{sd} - u_{gd}}{X_L} \\ \frac{di_q}{dt} = -\omega_B \frac{1}{X_L} u_{cq} - \omega_B i_d - \omega_B \frac{R_L}{X_L} i_q + \omega_B \frac{u_{sq} - u_{gq}}{X_L} \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_{cd} 、 u_{cq} 为串补电容两端电压的 d 、 q 轴分量; i_d 、 i_q 为系统输出电流的 d 、 q 轴分量; u_{gd} 、 u_{gq} 为外部电网电压的 d 、 q 轴分量; C_L 、 X_L 、 R_L 分别为线路电容、电感、电阻。

1.2 SVG 时域模型

SVG 可等效为幅值和相位可控的电压源, 在不同情况下, 起到发出或吸收无功的作用。其中, SVG 的一次回路经变压器接入三相电网。同时从直流电容采集直流电压, 从变压器低压侧采集交流电压, 以实现 d 、 q 轴的解耦控制, 具体结构如图 5 所示。

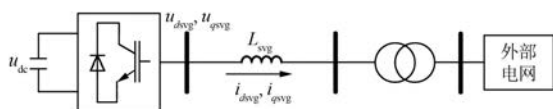


图 5 SVG 外部电路结构图

其在 dq 坐标系下的状态方程可表示为

$$\begin{cases} L_{svg} \frac{di_{dsvg}}{dt} = -R_{svg} i_{dsvg} + \omega L_{svg} i_{qsvg} + u_{dsvg} \\ L_{svg} \frac{di_{qsvg}}{dt} = -\omega L_{svg} i_{dsvg} - R_{svg} i_{qsvg} - u_{dc} + u_{qsvg} \\ C_{svg} \frac{du_{dc}}{dt} = -i_{qsvg} \end{cases} \quad (6)$$

式中: L_{svg} 、 R_{svg} 、 C_{svg} 分别为 SVG 的滤波电感、输出线路电阻、直流电容; i_{dsvg} 、 i_{qsvg} 和 u_{dsvg} 、 u_{qsvg} 分别为 SVG 输出的 d 、 q 轴电流分量和电压分量; u_{dc} 为直流电容电压。

SVG 采用定电压控制方式, 即用直流电压调制 d 轴电流信号, 以控制有功功率, 稳定直流电容电压; 用交流电压调制 q 轴电流信号, 以控制无功功率, 稳定并网点电压, 调整功率因数, SVG 控制

环节结构图如图 6 所示。

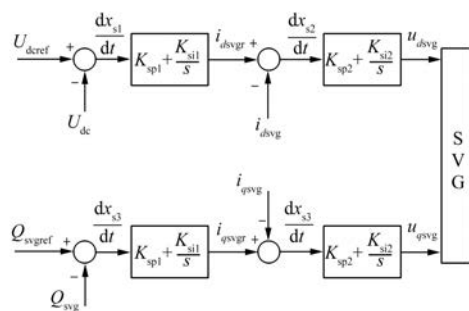


图 6 SVG 控制环节结构图

由图 6 可知, SVG 控制环节的状态方程为

$$\begin{cases} \frac{dx_{s1}}{dt} = u_{dref} - u_{dc} \\ \frac{dx_{s2}}{dt} = K_{sp1} \frac{dx_{s1}}{dt} + K_{si1} x_{s1} - i_{dsvg} \\ \frac{dx_{s3}}{dt} = Q_{svgref} - Q_{svg} \\ \frac{dx_{s4}}{dt} = K_{sp1} \frac{dx_{s3}}{dt} + K_{si1} x_{s3} - i_{qsvg} \end{cases} \quad (7)$$

式中: u_{dref} 为 SVG 直流电容电压参考值; x_{s1} 、 x_{s2} 、 x_{s3} 、 x_{s4} 为 SVG 控制器模型的中间变量; K_{sp1} 为 SVG d 轴外环比例系数; K_{si1} 为 SVG d 轴外环积分系数; Q_{svgref} 为 SVG 输出无功功率参考值; Q_{svg} 为 SVG 输出的无功功率。

2 系统小信号稳定性分析

联立式(1)~式(7), 可得含 SVG 的双馈发电系统的 22 阶状态空间模型:

$$\frac{d\Delta \mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \quad (8)$$

式中: 系统的状态变量 $\mathbf{x} = [\omega_t, \omega_r, \theta_B, i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}, x_1, x_2, x_3, x_4, u_{cd}, u_{cq}, i_d, i_q, i_{dsvg}, i_{qsvg}, u_{dc}, x_{s1}, x_{s2}, x_{s3}, x_{s4}]^T$; 系统的代数变量 $\mathbf{u} = [u_{sd}, u_{sq}, u_{rd}, u_{rq}]^T$; $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 分别为状态和代数变量系数矩阵。

利用 MATLAB 可得系统特征值, 其 6 组振荡模式如表 1 所示。

当系统串补度为 60% 时, 双馈系统含有 5 对共轭特征值。其中, 系统次同步振荡模式对应的特征值 $\lambda_{5,6} = 2.54 \pm j223.67$, 由特征值虚部可知, 系统发生频率为 35.60 Hz 的次同步振荡。当系统串补度为 60% 时, 在小扰动下, 输出的有功功

表 1 系统振荡模式及其特征值

参数名称	特征值	振荡频率/Hz	阻尼比
$\lambda_{1,2}$	$-16.98 \pm j505.11$	80.39	0.034
$\lambda_{3,4}$	$-21.44 \pm j158.02$	25.15	0.134
$\lambda_{5,6}$	$2.54 \pm j223.67$	35.60	-0.011
$\lambda_{7,8}$	$-6.76 \pm j61.39$	9.77	0.109
$\lambda_{9,10}$	$-17.49 \pm j136.53$	21.73	0.127
$\lambda_{11,12}$	$-19.95 \pm j185.27$	29.49	0.107

率波形图及频谱分析如图 7 和图 8 所示。图 8 表明,系统的输出有功功率中含有 36.36 Hz 的次同步振荡分量,与特征值分析结果一致。

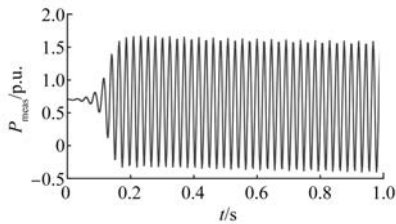


图 7 系统输出有功功率波形图

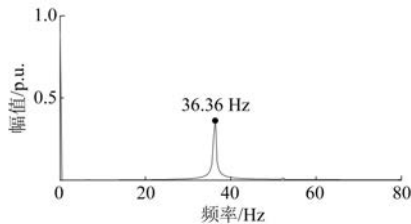


图 8 有功功率频谱分析图

参与因子可确定该振荡模式下的主要参与变量,如表 2 所示。表 2 表明,该振荡模式主要由 RSC 内环控制环节 (x_2, x_4)、串联补偿输电线路 (i_d, i_q) 以及 SVG 的内环控制环节 (x_{s2}, x_{s4}) 参与。其中,RSC 内环控制环节影响程度最大,因此考虑对 RSC 内环进行反馈线性化控制。

表 2 振荡主要参与变量及其参与因子

状态变量	x_2	x_4	i_d	i_q	x_{s2}	x_{s4}
参与因子	0.158	0.142	0.104	0.069	0.136	0.136

3 反馈线性化控制设计

3.1 反馈线性化方法简介

反馈线性化主要设计方法^[26]简述如下。

仿射非线性系统如下所示:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为系统的状态量; $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{y}$ 分别为系统的控制量和输出向量; $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 为相应的函数表达式。

当输出函数 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 对系统的相对阶 r 小于或等于系统的阶数(即系统状态量的个数)时,存在一坐标变换 $\mathbf{z} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$,可将仿射非线性系统转化为以下标准形式:

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{B}\mathbf{v} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{z}$ 、 $\mathbf{v}$ 分别为新的状态向量和控制向量; $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 为相应的常系数矩阵。

3.2 转子侧变流器的反馈线性化控制

RSC 是利用转子电流的 dq 分量,解耦控制风机输出的有功功率和无功功率。因此,选取 i_{rd} 、 i_{rq} 作为状态变量, $P_{\text{meas}} - P_{\text{ref}}$ 、 $Q_{\text{meas}} - Q_{\text{ref}}$ 作为输出变量,推导转子侧变流器的仿射非线性模型。

考虑定子电压定向条件下,由异步发电机的磁链方程可得:

$$\begin{cases} \psi_{rd} = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s} i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} \psi_{sd} \\ \psi_{rq} = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s} i_{rq} + \frac{L_m}{L_s} \psi_{sq} \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)代入异步发电机的电压方程,可得:

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s} \frac{di_{rd}}{dt} - \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s} \omega_{\text{slip}} i_{rq} + \omega_{\text{slip}} \frac{L_m}{\omega_1 L_s} U_s \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s} \frac{di_{rq}}{dt} + \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s} \omega_{\text{slip}} i_{rd} \end{cases} \quad (12)$$

式中: U_s 为定子电压; ω_{slip} 为定转子间的转差, $\omega_{\text{slip}} = \omega_1 - \omega_r$ 。

进一步整理可得转子侧变流器的仿射非线性模型,其形式与式(9)相同。

$$\mathbf{x} = [i_{rd} \quad i_{rq}]^T \quad (13)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{x}) \\ f_2(\mathbf{x}) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{L_s R_r}{L_s L_r - L_m^2} i_{rd} + \omega_{slip} i_{rq} - \omega_{slip} \frac{L_m}{\omega_1 (L_s L_r - L_m^2)} U_s \\ -\omega_{slip} i_{rd} - \frac{L_s R_r}{L_s L_r - L_m^2} i_{rq} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = [g_1(\mathbf{x}) \quad g_2(\mathbf{x})] = \frac{L_s}{L_s L_r - L_m^2} \mathbf{I}_{2 \times 2} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{I}_{2 \times 2}$ 为 2 阶单位矩阵。

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= [u_{rd} \quad u_{rq}]^T \quad (16) \\ \begin{cases} y_1 = P_{meas} - P_{ref} = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} U_s i_{rd} - P_{ref} \\ y_2 = Q_{meas} - Q_{ref} = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} U_s i_{rq} - \frac{3}{2} \frac{U_s^2}{L_s \omega_1} - Q_{ref} \end{cases} \quad (17) \end{aligned}$$

结合精确线性化条件,对转子侧变流器的仿射非线性模型进行验证。其向量的相对阶计算如下:

$$[L_{g1} h(\mathbf{x}) \quad L_{g2} h(\mathbf{x})] =$$

$$\dot{\mathbf{z}} = \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f h_1(\mathbf{x}) + L_{g1} h_1(\mathbf{x}) u_1 + L_{g2} h_1(\mathbf{x}) u_2 \\ L_f h_2(\mathbf{x}) + L_{g1} h_2(\mathbf{x}) u_1 + L_{g2} h_2(\mathbf{x}) u_2 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} U_s \left[-\frac{L_s R_r}{L_s L_r - L_m^2} i_{rd} + \omega_{slip} i_{rq} - \frac{\omega_{slip} L_m U_s}{\omega_1 (L_s L_r - L_m^2)} \right] - \frac{3}{2} \frac{L_m U_s}{L_s L_r - L_m^2} u_{rd} \\ -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} U_s \left[-\omega_{slip} i_{rd} - \frac{L_s R_r}{L_s L_r - L_m^2} i_{rq} \right] - \frac{3}{2} \frac{L_m U_s}{L_s L_r - L_m^2} u_{rq} \end{bmatrix} \quad (20)$$

根据式(19)~式(20)可得由 $\mathbf{z}$ 描述的标准线性系统,其形式与式(10)相同。

最后,确定原控制变量 $\mathbf{u}$ 与新控制变量 $\mathbf{v}$ 之间的关系,由式(10)、式(20)可得:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} &= -\frac{2(L_s L_r - L_m^2)}{3L_m U_s} \cdot \\ &\begin{bmatrix} \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} U_s \left[-\frac{L_s R_r}{L_s L_r - L_m^2} i_{rd} + \omega_{slip} i_{rq} - \frac{\omega_{slip} L_m U_s}{\omega_1 (L_s L_r - L_m^2)} \right] + v_1 \\ \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} U_s \left[-\omega_{slip} i_{rd} - \frac{L_s R_r}{L_s L_r - L_m^2} i_{rq} \right] + v_2 \end{bmatrix} \quad (21) \end{aligned}$$

其中,系统的新控制变量 $\mathbf{v}$ 可设定为

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z_1 \\ -z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} \frac{L_m U_s}{L_s} i_{rd} + P_{ref} \\ \frac{3}{2} \frac{L_m U_s}{L_s} i_{rq} + \frac{3}{2} \frac{U_s^2}{L_s \omega_1} + Q_{ref} \end{bmatrix} \quad (22)$$

结合式(21)和式(22),可得转子侧变流器在反馈线性化控制下的模型:

$$\begin{cases} u_{rd} = -\frac{2(L_s L_r - L_m^2)}{3L_m U_s} \left\{ \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} U_s \left[-\frac{L_s R_r}{L_s L_r - L_m^2} i_{rd} + \omega_{slip} i_{rq} - \frac{\omega_{slip} L_m U_s}{\omega_1 (L_s L_r - L_m^2)} \right] + P_{ref} - P_{meas} \right\} \\ u_{rq} = -\frac{2(L_s L_r - L_m^2)}{3L_m U_s} \left[\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} U_s \left(-\omega_{slip} i_{rd} - \frac{L_s R_r}{L_s L_r - L_m^2} i_{rq} \right) + Q_{ref} - Q_{meas} \right] \end{cases} \quad (23)$$

相应的控制框图如图 9 所示。

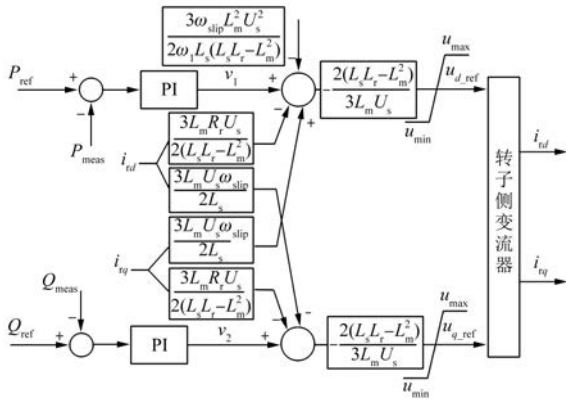


图 9 RSC 反馈线性化控制结构图

4 仿真实验

4.1 小扰动下的仿真实验

本节通过分析小扰动,采用不同控制策略时,系统的特征值轨迹及时域仿真波形,对比不同控制策略对系统稳定性的影响。

4.1.1 不同串补度

保持系统其他参数不变,分别在采用 PI 控制和反馈线性化控制的系统中,设置不同的线路串补度(从 10% 开始,每次增加 10%~80%),可得不同串补度下,振荡模式根轨迹如图 10 所示。

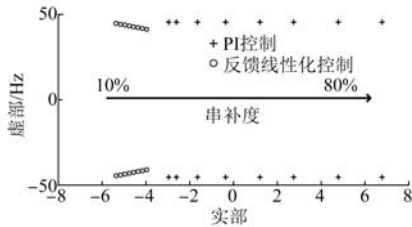


图 10 不同串补度下振荡模式的根轨迹

由图 10 可知,随着串补度增加,PI 控制的系统阻尼快速下降。当串补度高于 40% 时,采用 PI 控制的系统阻尼为负,而采用反馈线性化控制的系统始终保持正阻尼。因此,与 PI 控制相比,反馈线性化控制对系统阻尼起到的增强效果更好。

对采用不同控制策略的系统进行时域仿真分

析,可得线路串补度分别为 10%、50%、80% 时,系统输出有功功率如图 11 所示。

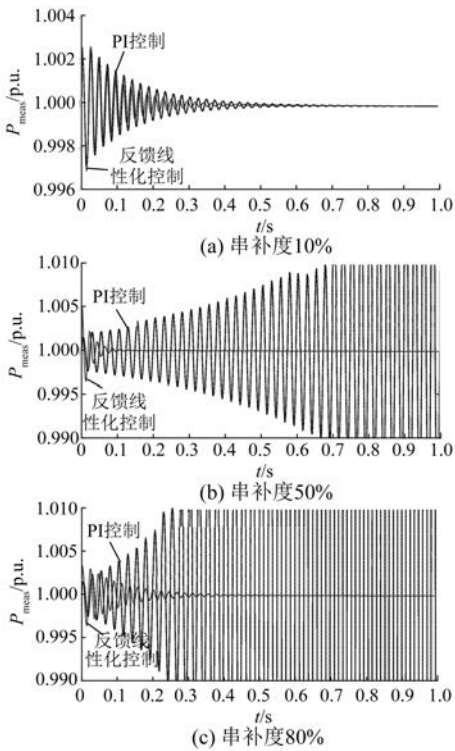


图 11 不同串补度下系统的输出有功功率

图 11 表明,当线路串补度为 10% 时,两种控制方式下系统均稳定,采用反馈线性化控制的系统,振荡衰减的速度快于采用 PI 控制的系统;当线路串补度为 50% 及 80% 时,PI 控制下的系统功率振荡发散,而采用反馈线性化控制的系统仍然稳定。以上现象均与特征值分析结果相符合。

4.1.2 不同风速

保持系统其他参数不变,设定串补度为 60%,且分别在采用 PI 控制和反馈线性化控制的系统中,设置不同的输入风速(从 5 m/s 开始,步长 1 m/s,至 12 m/s),可得不同风速下,振荡模式的根轨迹如图 12 所示。

由图 12 可知,随着风速减小,系统阻尼迅速下降。当风速为 11 m/s 及以下时,采用 PI 控制的系统阻尼为负。与采用 PI 控制的系统相比,采

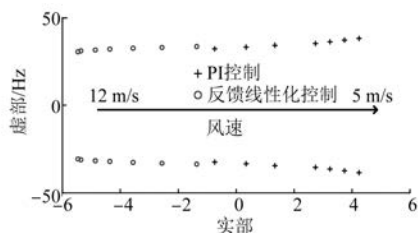


图 12 不同风速下振荡模式的根轨迹

用反馈线性化控制的系统均有效增强了系统振荡模式的阻尼。

分别在风速为 12 m/s、7 m/s 以及 5 m/s 的条件下,对采用不同控制策略的系统进行时域仿真,所得系统的输出有功功率如图 13 所示。

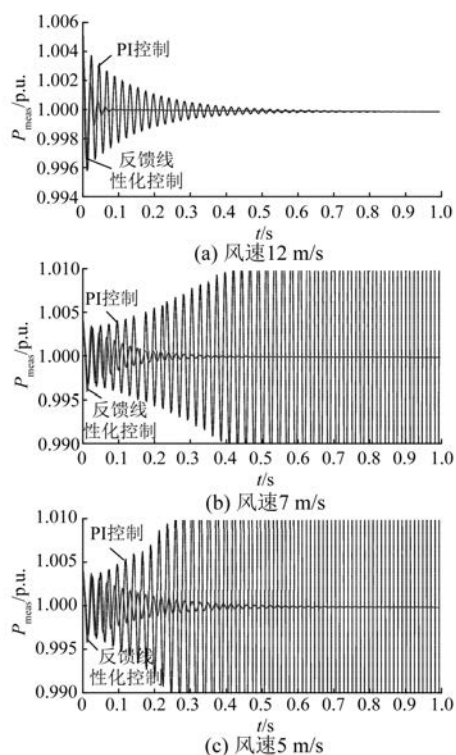


图 13 不同风速下系统的输出有功功率

图 13 表明,当风速为 12 m/s 时,即高风速条件下,采用两种控制策略的系统经暂态过程后,均稳定收敛,但反馈线性化控制收敛速度明显快于 PI 控制。而风速为 7 m/s 或 5 m/s 时,PI 控制策略下的系统振荡未稳,采用反馈线性化控制的系统仍然保持稳定。以上现象均与特征值分析结果相符合。

4.2 大扰动下的有效性验证

在大扰动下,对比 PI 控制与反馈线性化控制

对非线性环节的优化控制效果。调整风速为 8 m/s、串补度为 40%,此时系统为正阻尼系统。通过改变系统初值,使其远离平衡点的方式,可以模拟大扰动后系统的运行情况。

4.2.1 PI 控制下的稳定性分析

系统 RSC 内环采用 PI 控制时,控制器限幅环节设置与图 3 一致。其中, u_{d_ref} 限幅上限值为 2。通过 MATLAB 计算可得系统平衡点 u_{d_ref} 值为 1.46。当 u_{d_ref} 扰动后初值下降为 1 时, u_{d_ref} 及系统输出的有功功率波形图分别如图 14 和图 15 所示。

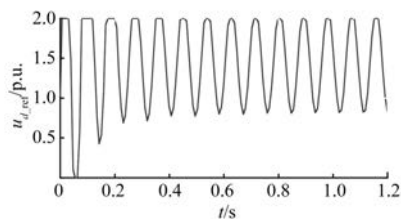


图 14 PI 控制下保留限幅时的 u_{d_ref} 波形图

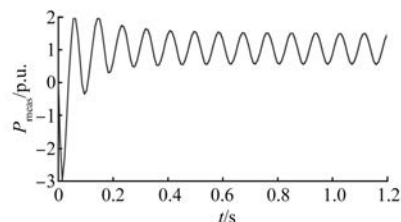


图 15 PI 控制下保留限幅时的有功功率波形图

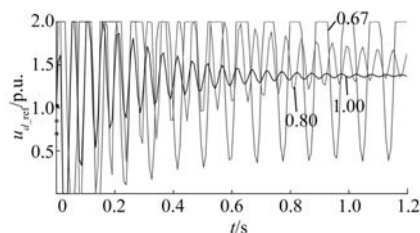
由图 14 可知,大扰动后, u_{d_ref} 电压限幅持续饱和,而对应正阻尼系统的输出功率中则出现 10.1 Hz 的限幅参与的次同步振荡(切换型振荡)。

从分岔角度看,系统轨迹从初值点出发经暂态过程,最终运行在平衡点周围的非光滑极限环(RSC 限幅持续饱和),说明正阻尼系统在限幅参与下发生了切换型振荡。

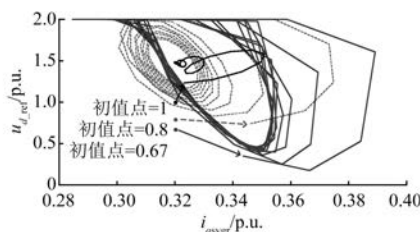
4.2.2 反馈线性化控制下的稳定性分析

保持系统其他设置不变,当系统 RSC 采用反馈线性化控制时,在 RSC 的 d 轴电压参考值出口处设置与图 9 相同的限幅环节。逐步下调 u_{d_ref} 初值,所得部分 u_{d_ref} 波形如图 16 所示。

由图 16 可知,当 u_{d_ref} 初值为 1 时,与 PI 控制时系统发生切换型振荡相比,采用反馈线性化控

图 16 FLC 下不同初值时的 u_{d_ref} 波形图

制的系统经暂态过程后并未发生振荡。而进一步下降 u_{d_ref} 初值为 0.8 时,系统仍为收敛趋势。最终,当 u_{d_ref} 初值下调至 0.67 时,系统发生切换型振荡。与上述波形相应的系统运行轨迹如图 18 所示(为直观,忽略了部分暂态过程)。

图 17 FLC 下不同初值时的 $i_{qsvgr}-u_{d_ref}$ 相图

从分岔角度分析,当 u_{d_ref} 初值大于 0.67 时,系统运行轨迹从初值点出发,经暂态过程逐渐回归平衡点(初值为 1 时对应点线,初值为 0.8 时对应虚线);当初值小于 0.67(系统轨迹对应实线)时,系统运行轨迹最终运行在平衡点周围的非光滑极限环(切换面为 u_{d_ref} 限幅上限),对应正阻尼系统出现切换型振荡。

综上,对于大扰动下的正阻尼系统,采用 PI 控制时,初值为 1 即发生切换型振荡。而采用反馈线性化时,初值降为 0.67 才发生切换型振荡。这说明采用反馈线性化控制能有效增大平衡点的吸引域,从而增强系统的稳定性。

5 结 语

本文结合反馈线性化控制原理,设计了 DFIG 转子侧变流器的反馈线性化控制策略。通过特征值分析和相图分析,分别验证了系统小/大扰动下的控制效果,结果表明反馈线性化控制比传统 PI 控制更优,主要结论如下:

(1) 反馈线性化控制有效减弱了控制环节中非线性带来的影响,优化了控制器的结构。在不同运行条件下,反馈线性化控制均对系统稳定性

起到了较好的增强效果。

(2) 对于小扰动下的系统,在低风速、高串补的条件下,反馈线性化控制均能有效增强系统阻尼,抑制次同步振荡。

(3) 对于大扰动下的系统,采用反馈线性化控制能有效增大系统平衡点的吸引域,从而使系统能承受更大的初值偏移,增强了系统的稳定性。

【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.
- [2] 谢小荣,王路平,贺静波,等. 电力系统次同步谐振/振荡的形态分析[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1043.
- [3] LEON A E. Integration of DFIG-based wind farms into series-compensated transmission systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(2): 451.
- [4] 胡应宏,邓春,谢小荣,等. DFIG-串补输电系统次同步谐振的附加阻尼控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1169.
- [5] 董晓亮,谢小荣,田旭. DFIG 定子侧变流器的附加阻尼抑制次同步振荡方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2785.
- [6] 周佩朋,宋瑞华,李光范,等. 基于附加比例谐振控制的风机次同步振荡抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3797.
- [7] LEON A E, SOLSONA J A. Sub-synchronous interaction damping control for DFIG wind turbines [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 419.
- [8] WANG L, PENG J, YOU Y, et al. SSCI performance of DFIG with direct controller [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(10): 2697.
- [9] FAN L, MIAO Z. Mitigating SSR using DFIG-based wind generation [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(3): 349.
- [10] 吕敬,蔡旭. 提高风场柔直并网系统稳定性的控制器参数优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 431.
- [11] 盛逸标,林涛,陈宝平,等. 面向新能源外送系统次/超同步振荡的控制器参数协调优化[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 983.
- [12] 蒋平,陈琼,吴熙,等. 利用重复控制跟踪的统一潮

- 流控制器抑制系统强迫振荡方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(18): 64.
- [13] 赵洋, 肖湘宁. 利用 SSSC 阻尼电力系统低频振荡[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 40.
- [14] 张辰, 柯德平, 孙元章. 双馈风电机组附加阻尼控制器与同步发电机 PSS 协调设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 30.
- [15] SURINKAEW T, NGAMROO I. Coordinated robust control of DFIG wind turbine and PSS for stabilization of power oscillations considering system uncertainties [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3): 823.
- [16] 薛安成, 付潇宇, 乔登科, 等. 风电参与的电力系统次同步振荡机理研究综述和展望[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 118.
- [17] 董晓亮, 李江, 侯金鸣. 基于 DFIG 转子侧变流器的次同步谐振抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 92.
- [18] LIU H, XIE X, HE J, et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4708.
- [19] 吕敬, 董鹏, 施刚, 等. 大型双馈风电场经 MMC-HVDC 并网的次同步振荡及其抑制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4852.
- [20] 栾某德, 甘德强, 李尚远. 基于观测器信号灵敏度差异化设计的强迫振荡扰动源定位[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 95.
- [21] 李尚远, 甘德强, 栾某德. 一种基于功率谱密度的发电机机械功率扰动源定位方法[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 236.
- [22] 薛安成, 王永杰, 付潇宇, 等. 含 SVG 的双馈系统切换型次同步振荡及其非光滑分岔特性分析[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 918.
- [23] 薛安成, 王子哲, 付潇宇, 等. 基于非光滑分叉的直驱风机次同步振荡机理分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 87.
- [24] CHOWDHURY M A, MAHMUD M A, SHEN W, et al. Nonlinear controller design for series-compensated DFIG-based wind farms to mitigate subsynchronous control interaction[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(2): 707.
- [25] 邵冰冰, 赵书强, 高本锋, 等. 基于反馈线性化滑模控制的直驱风电场经柔直并网系统次同步振荡抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3090.
- [26] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

[主要栏目]

- | | | |
|--------------|-----------|-------------|
| · 控制与应用技术 | · 研究与设计 | · 故障诊断与保护 |
| · 新能源发电与局域电网 | · 新能源汽车技术 | · 发电机组及其控制 |
| · 测试技术与测控系统 | · 材料与工艺 | · 电机生产及质量管理 |
| · 电力电子变流器技术 | · 智能制造 | · 节能应用 |
| · 实用技术成果 | | |

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部