

基于反馈线性化的双馈风电机组次同步控制 相互作用抑制策略*

李鹏瀚, 王 杰, 吴 飞

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘 要: 大规模风电经固定串补线路送出时, 由于变流器与固定串补之间的相互作用, 使双馈风电机组 (DFIG) 可能会存在一种新的次同步谐振 (SSR) 问题, 称为次同步控制相互作用 (SSCI)。提出反馈线性化控制策略, 并将之应用于 DFIG 转子侧变流器和网侧变流器控制回路以抑制 SSCI。首先对系统的反馈线性化条件进行验证, 再选取合适的坐标变换, 在保证系统零动态稳定的前提下求得非线性状态反馈规律。在 MATLAB/Simulink 下的仿真结果表明: 与参数已整定的比例-积分控制策略相比, 反馈线性化控制策略能够有效抑制 SSCI, 使 DFIG 在不同串补度和风速下都能保持稳定运行, 且不影响 DFIG 的故障穿越能力。

关键词: 双馈风电机组; 次同步谐振; 次同步控制相互作用; 反馈线性化

中图分类号: TM 614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)01-0119-07

Controller Design Based on Feedback Linearization for Damping of Sub-Synchronous Control Interaction in Doubly Fed Induction Generator*

LI Penghan, WANG Jie, WU Fei

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University,
Shanghai 200240, China)

Abstract: A nonlinear controller based on feedback linearization technique was proposed to mitigate sub-synchronous control interaction (SSCI) in series-compensated doubly fed induction generator (DFIG). The feedback linearization controller was developed for rotor side converter (RSC) and grid side converter (GSC) through four necessary steps, i.e., assessment of the feedback linearizability, coordinate transformation, feedback linearization, and derivation of control laws. A DFIG-based wind farm adapted from the IEEE first benchmark model was utilized to evaluate the performance of the designed controller at varied wind speeds and compensation levels, and the capability of the proposed controller in mitigating SSCI was compared to a well-tuned proportional-integral (PI) controller. The simulation results demonstrated the superior damping performance of the designed controller.

Key words: doubly fed induction generator (DFIG); sub-synchronous resonance; sub-synchronous control interaction; feedback linearization

0 引 言

随着风力发电的迅猛发展, 大量风电机组通过变流器经固定串补接入电网, 导致新型次同步

谐振 (SSR) 问题的出现^[1]。双馈感应发电机 (DFIG) 型风电机组由于电流内环控制的参与, 导致谐振风险加剧^[2]。2009 年, 美国德州南部某风电场, 因线路故障导致系统接线方式发生变化, 双

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (61374155)

作者简介: 李鹏瀚 (1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。

王 杰 (1960—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制、智能电网、复杂系统分析和控制方法。

吴 飞 (1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。

馈风电机群放射式接入串补电网,引发严重 SSR 事故^[3]。故障分析表明,该新型 SSR 现象是由 DFIG 转子侧变流器与固定串补电网的相互作用引起的,因而被称为次同步控制相互作用 (SSCI)。由于 SSCI 无机械部分参与作用,系统对其阻尼作用较小,与传统 SSR 故障相比,SSCI 发散速度更快,危害更为严重。

静止无功补偿器 (SVC) 以及可控串补 (TCSC) 等柔性交流输电系统 (FACTS) 设备都被用于 SSCI 抑制策略的设计。该方法响应速度快,抑制效果好,但设备价格昂贵。文献[4]通过在 DFIG 网侧变流器的电流环上增设阻尼回路来抑制 SSCI。文献[5]将阻尼控制回路与二自由度控制策略相结合,增强了系统稳定性并较好地抑制了 SSR。文献[6]将模糊控制应用于 DFIG 网侧变流器控制回路以增大系统阻尼。文献[4-6]所提控制策略无需额外增加设备,是经济有效的抑制措施,但均采用一点处近似线性化的数学模型,没有充分考虑 DFIG 固有的非线性特性,不能使系统的实际运行状态在远离所选的近似线性化状态点处获得符合要求的稳定性能和动态品质。对于慢动态过程的非线性系统,可采用自适应技术进行补偿。但对于动态过程较快的电力系统,使用这种方法难以奏效。

非线性控制理论指出,在满足一定条件时,采用恰当的坐标变换与非线性状态反馈,可以使系统自身非线性特性得以抵消,且可保证控制系统的稳定性和良好的动态品质。这一方法被称为反馈线性化控制策略^[7]。反馈线性化方法可使非线性系统在状态空间的一个足够大的域中甚至整个状态空间中实现解耦控制,非常适合工况复杂且存在强耦合的双馈风力发电系统。因此本文提出反馈线性化控制策略以抑制 DFIG 并网系统可能存在的 SSCI。首先验证系统的反馈线性化条件;其次利用坐标变换将原系统转换为线性系统;最后在保证零动态稳定的前提下求得非线性状态反馈规律。通过特征值分析和时域仿真,将所提控制方法与参数已整定的比例-积分 (PI) 控制策略进行比较。仿真结果表明,反馈线性化控制策略不仅在不同风速和串补度下都能有效抑制 SSCI,而且不影响 DFIG 的故障穿越能力。

1 DFIG 并网系统建模

DFIG 并网系统模型主要包括轴系、感应发电机、转子侧变流器、直流母线环节、网侧变流器以及串补输电线路。分别建立系统转子侧模型和网侧模型。系统结构如图 1 所示。

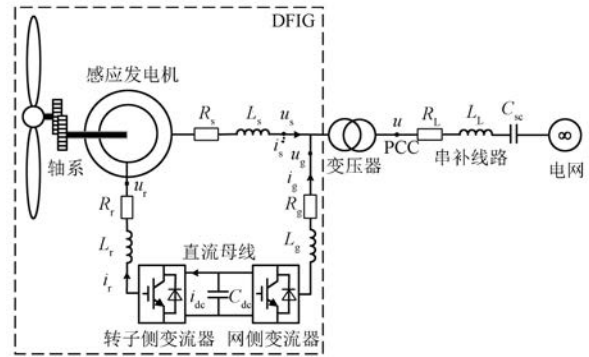


图 1 DFIG 经串补并网结构图

1.1 DFIG 并网系统转子侧模型

在 dq 同步旋转坐标系下,DFIG 并网系统电压方程和磁链方程分别为^[4]

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_s \psi_{sq} + p\psi_{sd} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \psi_{sd} + p\psi_{sq} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} - \omega_{slip} \psi_{rq} + p\psi_{rd} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \omega_{slip} \psi_{rd} + p\psi_{rq} \end{cases} \quad (1)$$

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

式中: u 、 i 、 ψ ——电压、电流、磁链;

下标 s 、 r ——定子和转子分量;

下标 d 、 q —— d 轴和 q 轴分量;

R 、 L ——电阻和电感;

ω_s ——同步角速度;

d/dt ——微分算子;

ω_{slip} ——转差角速度。

在定子电压定向条件下,DFIG 定子输出有功功率和无功功率分别为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3L_m}{2L'_s} U_s i_{rd} \\ Q_s = -\frac{3U_s}{2\omega_s L'_s} (U_s + \omega_s L_m i_{rq}) \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,通过对转子电流的控制可以实现 DFIG 有功功率和无功功率的控制,因此选择转子电流 d 、 q 分量作为状态变量,可得系统转子侧模型的 MIMO 形式:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_1(\mathbf{x})\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{cases}$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} -\frac{R_r}{L_r}i_{rd} + \omega_{slip}i_{rq} - \frac{\omega_{slip}L_m}{\omega_s L_s L_r}U_s \\ -\frac{R_r}{L_r}i_{rq} - \omega_{slip}i_{rd} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 1/L_r & 0 \\ 0 & 1/L_r \end{bmatrix}, \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} P_s - P_s^* \\ Q_s - Q_s^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{x}$ ——状态变量, $\mathbf{x} = [i_{rd} \ i_{rq}]^T$;
 $\mathbf{u}$ ——控制变量, $\mathbf{u} = [u_{rd} \ u_{rq}]^T$;
 $\mathbf{y}$ ——输出方程, $\mathbf{y} = [P_s - P_s^* \ Q_s - Q_s^*]^T$;
 P_s^* 、 Q_s^* ——定子输出有功功率和无功率的参考值。

1.2 DFIG 并网系统网侧模型

采用双质量块轴系模型,动态方程为^[4]

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\omega_m = \frac{1}{2H_t}(T_L - K_s\gamma - D_t\omega_m) \\ \frac{d}{dt}\omega_r = \frac{1}{2H_g}(K_s\gamma - T_e - D_g\omega_r) \\ \frac{d}{dt}\gamma = 2\pi f(\omega_m - \omega_r/N_g) \end{cases} \quad (5)$$

式中: ω_m ——风力机转速;
 下标 t 、 g ——风力机和发电机转子;
 H ——惯性常数;
 T_L ——转子轴受到的机械转矩;
 K_s ——轴系的刚度系数;
 γ ——风力机相对于转子的角位移;
 D ——阻尼系数;
 ω_r ——转子转速;
 T_e ——电磁转矩;
 f ——电网频率;
 N_g ——齿轮箱加速比。

根据网侧变流器拓扑结构,系统网侧模型为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}i_{gd} = \omega_s i_{gq} - \frac{R_g}{L_g}i_{gd} - \frac{u_{gd}}{L_g} + \frac{u_{dc}}{L_g}S_d \\ \frac{d}{dt}i_{gq} = -\omega_s i_{gd} - \frac{R_g}{L_g}i_{gq} - \frac{u_{gq}}{L_g} + \frac{u_{dc}}{L_g}S_q \\ \frac{d}{dt}u_{dc} = \frac{1}{C_{dc}}i_{dc} - \frac{1}{C_{dc}}i_{gd}S_d - \frac{1}{C_{dc}}i_{gq}S_q \end{cases} \quad (6)$$

式中: i_{gd} 、 i_{gq} ——网侧变流器输入电流 d 、 q 轴分量;

u_{dc} ——直流电容两端电压;

R_g ——线路电阻;

L_g ——进线电抗器电感;

S_d 、 S_q ——网侧变流器开关函数。

在 dq 同步旋转坐标系下,输电线路和固定串补的动态方程分别为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}i_d = \omega_s i_q + \frac{R_L}{L_L}i_d - \frac{1}{L_L}(u_d - u_{scd} - e_d) \\ \frac{d}{dt}i_q = \omega_s i_d + \frac{R_L}{L_L}i_q - \frac{1}{L_L}(u_q - u_{scq} - e_q) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}u_{scd} = \omega_s u_{scq} + \frac{1}{C_{sc}}i_d \\ \frac{d}{dt}u_{scq} = \omega_s u_{scd} + \frac{1}{C_{sc}}i_q \end{cases} \quad (8)$$

式中: i_d 、 i_q ——输电线路电流 d 轴、 q 轴分量;

R_L 、 L_L ——串补输电线路等效电阻、等效电感;

u_d 、 u_q ——公共连接点 (PCC) 电压 d 轴、 q 轴分量;

u_{scd} 、 u_{scq} ——固定串补电容两端电压 d 轴、 q 轴分量;

e_d 、 e_q ——电网电压 d 轴、 q 轴分量;

C_{sc} ——串补电容。

由式(5)~式(8)可得系统网侧模型的 MIMO 形式:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\tilde{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{f}}(\tilde{\mathbf{x}}) + \tilde{\mathbf{g}}_1(\tilde{\mathbf{x}})\tilde{\mathbf{u}}_1 + \tilde{\mathbf{g}}_2(\tilde{\mathbf{x}})\tilde{\mathbf{u}}_2 \\ \tilde{\mathbf{y}}_1 = \tilde{\mathbf{h}}_1(\tilde{\mathbf{x}}) \\ \tilde{\mathbf{y}}_2 = \tilde{\mathbf{h}}_2(\tilde{\mathbf{x}}) \end{cases} \quad (9)$$

其中: 状态变量 $\tilde{\mathbf{x}} = [i_{gq} \ i_{gd} \ u_{dc} \ i_q \ i_d \ u_{scq} \ u_{scd} \ \omega_m \ \omega_r \ \gamma]^T$; 控制变量 $\tilde{\mathbf{u}} = [S_q \ S_d]^T$; 输出量 $\tilde{\mathbf{y}} = [i_{gq} \ u_{dc}]^T$;

$$\begin{aligned} \tilde{f}(\bar{x}) = & \begin{bmatrix} -\omega_s i_{gd} - (R_g i_{gq})/L_g - u_{gq}/L_g \\ \omega_s i_{gq} - (R_g i_{gd})/L_g - u_{gd}/L_g \\ i_{dc}/C_{dc} \\ (T_{ae} - K_s \gamma - D_1 \omega_m)/(2H_1) \\ (K_s \gamma - T_e - D_g \omega_r)/(2H_g) \\ 2\pi f(\omega_m - \omega_r/N_g) \\ -\omega_s u_{scd} + i_q/C_{sc} \\ \omega_1 u_{scq} + i_d/C_{sc} \\ -\omega_s i_d + (R_L i_q)/L_L + (u_q - u_{scq} - e_q)/L_L \\ \omega_s i_q + (R_L i_d)/L_L + (u_d - u_{scd} - e_d)/L_L \end{bmatrix}, \\ \tilde{g}(\bar{x}) = & \begin{bmatrix} u_{dc}/L_g & 0 \\ 0 & u_{dc}/L_g \\ -(i_{gq}/C_{dc}) & -(i_{gd}/C_{dc}) \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

2 反馈线性化抑制策略设计

2.1 系统转子侧模型反馈线性化抑制策略设计

根据文献[7]给出的反馈线性化条件,对式(4)进行验证:

$$\begin{cases} L_f g_1 = \frac{\partial g_1}{\partial x} f - \frac{\partial f}{\partial x} g_1 = \begin{bmatrix} R_r/(L_r)^2 \\ \omega_{slip}/L_r \end{bmatrix} \\ L_f g_2 = \frac{\partial g_2}{\partial x} f - \frac{\partial f}{\partial x} g_2 = \begin{bmatrix} -\omega_{slip}/L_r \\ R_r/(L_r)^2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

式中: L ——Lie 导数。

由式(10)可知,矩阵 $[g(x) L_f g(x)]$ 在 $x \neq 0$ 处秩为 2,等于系统阶数,故可将系统进行精确反馈线性化。

选择坐标变换:

$$\begin{cases} z_1 = h_1(x) = P_s - P_s^* \\ z_2 = h_2(x) = Q_s - Q_s^* \end{cases} \quad (11)$$

z_1, z_2 为变换后线性系统的状态变量,其定时求导:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} z_1 = \frac{\partial h_1(x)}{\partial x} \frac{d}{dt} x = \frac{3L_m U_s}{2L_s} f_1 + \frac{3L_m U_s}{2L_s L_r} u_1 \\ \frac{d}{dt} z_2 = \frac{\partial h_2(x)}{\partial x} \frac{d}{dt} x = -\frac{3L_m U_s}{2L_s} f_2 - \frac{3L_m U_s}{2L_s L_r} u_2 \end{cases} \quad (12)$$

, 令 $dz_i/dt = v_i$, 可得:

$$\begin{cases} v_1 = \frac{3L_m U_s}{2L_s} f_1 + \frac{3L_m U_s}{2L_s L_r} u_1 \\ v_2 = -\frac{3L_m U_s}{2L_s} f_2 - \frac{3L_m U_s}{2L_s L_r} u_2 \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13),可得原系统的状态反馈规律为

$$\begin{cases} u_1 = R_r i_{rd} - \omega_{slip} L_r i_{rq} + \frac{\omega_{slip} L_m}{\omega_s L'_s} U_s + \frac{2L_s L_r}{3L_m U_s} v_1 \\ u_2 = R_r i_{rq} + \omega_{slip} L_r i_{rd} - \frac{2L_s L_r}{3L_m U_s} v_2 \end{cases} \quad (14)$$

对上述线性系统设计控制律 v 为

$$\begin{cases} v_1 = -z_1 = P_s^* - \frac{3L_m}{2L_s} U_s i_{rd} \\ v_2 = -z_2 = Q_s^* + \frac{3U_s}{2\omega_s L_s} (U_s + \omega_s L_m i_{rq}) \end{cases} \quad (15)$$

2.2 系统网侧模型反馈线性化抑制策略设计

根据文献[7]给出的反馈线性化条件,对式(9)进行验证:

$$\begin{cases} L_g L_f^{1-1} \bar{h}_1(\bar{x}) = L_g \bar{h}_1(\bar{x}) = \begin{bmatrix} u_{dc}/L_g \\ 0 \end{bmatrix} \\ L_g L_f^{1-1} \bar{h}_2(\bar{x}) = L_g \bar{h}_2(\bar{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ (i_{gq} S_q + i_{gd} S_d)/C_{dc} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)可知,系统关系度为 2,小于系统阶数,故可将系统进行部分反馈线性化。根据零动态设计法,可将系统动态分为外部动态与内部动态,通常要求系统外部动态不仅稳定且有良好动态品质,而内部动态保持稳定即可。部分反馈线性化所设计的控制律简单实用,适用于高阶复杂非线性系统。

通过部分反馈线性化,式(9)可转化为两个子系统:

$$\frac{d}{dt} \bar{z} = \bar{A} \bar{z} + \bar{B} \bar{v} \quad (17)$$

$$\frac{d}{dt}\hat{\mathbf{z}} = \hat{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{z}} \quad (18)$$

其中:式(17)为经过非线性坐标变换后得到的线性化子系统;式(18)为未经坐标变换的子系统。这组决定系统内部动态行为的方程组被称为原系统的零动态方程组; $\hat{\mathbf{z}}$ 、 $\hat{\mathbf{v}}$ 、 $\hat{\mathbf{A}}$ 和 $\hat{\mathbf{B}}$ 分别为线性化子系统的状态变量、控制变量、系统矩阵和输入矩阵; $\hat{\mathbf{z}}$ 和 $\hat{\mathbf{A}}$ 分别为零动态方程组的状态变量和系统矩阵。

经过部分线性化后的系统状态变量为

$$\mathbf{z} = \phi(\bar{\mathbf{x}}) = [\bar{\mathbf{z}} \quad \hat{\mathbf{z}}]^T \quad (19)$$

式中: ϕ ——关于 $\bar{\mathbf{x}}$ 的坐标变换函数。

选择坐标变换:

$$\begin{cases} \bar{z}_1 = \bar{\phi}_1(\bar{\mathbf{x}}) = \bar{h}_1(\bar{\mathbf{x}}) = i_{gq} \\ \bar{z}_2 = \bar{\phi}_2(\bar{\mathbf{x}}) = \bar{h}_2(\bar{\mathbf{x}}) = i_{dc} \end{cases} \quad (20)$$

式(20)对时间求导,可得:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\bar{z}_1 = \frac{\partial h_1(\bar{\mathbf{x}})}{\partial \bar{\mathbf{x}}} \frac{d}{dt}\bar{\mathbf{x}} = -\omega_s i_{gd} - \frac{R_g}{L_g} i_{gq} - \frac{u_{gq}}{L_g} + \frac{u_{dc}}{L_g} S_q \\ \frac{d}{dt}\bar{z}_2 = \frac{\partial h_2(\bar{\mathbf{x}})}{\partial \bar{\mathbf{x}}} \frac{d}{dt}\bar{\mathbf{x}} = \frac{1}{C_{dc}} i_{dc} - \frac{1}{C_{dc}} i_{gq} S_d - \frac{1}{C_{dc}} i_{gq} S_q \end{cases} \quad (21)$$

令 $d\bar{z}_i/\bar{v}_i$, 可得式(9)部分线性化模型为

$$\begin{cases} \bar{v}_1 = -\omega_s i_{gd} - \frac{R_g}{L_g} i_{gq} - \frac{u_{gq}}{L_g} + \frac{u_{dc}}{L_g} S_q \\ \bar{v}_2 = \frac{1}{C_{dc}} i_{dc} - \frac{1}{C_{dc}} i_{gq} S_d - \frac{1}{C_{dc}} i_{gq} S_q \end{cases} \quad (22)$$

为了保证线性化子系统的稳定,需要合理构造坐标变换函数满足如下条件:

$$\begin{cases} L_{g1}\hat{\phi}(\bar{\mathbf{x}}) = 0 \\ L_{g2}\hat{\phi}(\bar{\mathbf{x}}) = 0 \end{cases} \quad (23)$$

构造坐标变换如下:

$$\hat{\phi}(\bar{\mathbf{x}}) = \hat{\mathbf{z}} = [\hat{z}_3 \quad \hat{z}_4 \quad \cdots \quad \hat{z}_9 \quad \hat{z}_{10}]^T = [\hat{z}_3 \quad i_q \quad i_d \quad u_{sq} \quad u_{sd} \quad \omega_m \quad \omega_r \quad \gamma]^T \quad (24)$$

其中, $\hat{z}_3$ 的表达式为

$$\hat{z}_3 = \frac{1}{2}L_g i_{gd}^2 + \frac{1}{2}L_g i_{gq}^2 + \frac{1}{2}C_{dc} u_{dc}^2 \quad (25)$$

由于稳态时 $i_{gd} = i_{gq} = 0$, 故 $\hat{z}_3$ 可表示为

$$\hat{z}_3 = \frac{1}{2}C_{dc} u_{dc}^2 \quad (26)$$

关于 $\hat{z}_3$ 的动态方程为

$$\frac{d}{dt}\hat{z}_3 = L_f \hat{\phi}(\bar{\mathbf{x}}) = L_g i_{gd} \left(\omega_s i_{gq} - \frac{R_g}{L_g} i_{gd} - \frac{u_{gd}}{L_g} \right) \quad (27)$$

由式(26)和式(27)可得:

$$\frac{d}{dt}\hat{z}_3 = -R_g i_{gd}^2 \quad (28)$$

其余状态变量的动态方程为

$$\frac{d}{dt}\hat{z}_i = L_f \hat{\phi}(\bar{\mathbf{x}}) = 0; i = 4, 5, \dots, 10 \quad (29)$$

因此,系统零动态稳定。

根据式(22),可得原系统的状态反馈律为:

$$\begin{cases} S_q = \frac{L_g}{u_{dc}} \left(\bar{v}_1 + \omega_s i_{gd} + \frac{R_g}{L_g} i_{gq} + \frac{u_{gq}}{L_g} \right) \\ S_d = \frac{C_{dc}}{i_{gd}} \left(\bar{v}_2 - \frac{i_{dc}}{C_{dc}} + \frac{L_g i_{gq}}{C_{dc} u_{dc}} \right) \\ \left(\bar{v}_1 + \omega_s i_{gd} + \frac{R_g}{L_g} i_{gq} + \frac{u_{gq}}{L_g} \right) \end{cases} \quad (30)$$

对上述线性系统设计控制律 $\bar{\mathbf{v}}$ 为

$$\begin{cases} \bar{v}_1 = k_{1p}(i_{gq}^* - i_{gq}) + k_{1i} \int_0^t (i_{gq}^* - i_{gq}) dt \\ \bar{v}_2 = k_{2p}(u_{dc}^* - u_{dc}) + k_{2i} \int_0^t (u_{dc}^* - u_{dc}) dt \end{cases} \quad (31)$$

其中,参考值由转子输出有功功率参考值 P_r^* 根据最大功率点跟踪(MPPT)方法计算可得^[8]:

$$\begin{cases} i_{gq}^* = (2P_r^*) / (3u_{gq}) \\ u_{dc}^* = P_r^* / i_{dc} \end{cases} \quad (32)$$

式(31)中的控制参数为

$$\begin{cases} k_{1p} = 2i_{gq}^*, k_{1i} = (i_{gq}^*)^2 \\ k_{2p} = 2v_{dc}^*, k_{2i} = (v_{dc}^*)^2 \end{cases} \quad (33)$$

3 仿真验证

为了检验反馈线性化抑制策略的有效性,以 100 MW DFIG 和 690 kV 传输系统为基础,利用 MATLAB 分别进行特征值分析与时域仿真分析,并与参数已整定的 PI 控制策略^[9]进行对比。DFIG 并网系统参数^[10]如表 1 所示。

3.1 特征值分析

特征值分析是对电力系统模型进行线性化处理后,通过求解系统系数矩阵的特征值来判断系统稳定性的一种方法。特征值分析法能够提供被

表 1 DFIG 并网系统参数

参数名称	参数值
定子电阻 $R_s/p.u.$	0.008 4
定子电感 $L_s/p.u.$	0.167
转子电阻 $R_r/p.u.$	0.008 3
转子电感 $L_r/p.u.$	0.132 3
定转子互感 $L_m/p.u.$	5.419
直流母线电容 C_{dc}/mF	10
网侧变流器滤波器电阻 $R_g/p.u.$	0.001 5
网侧变流器滤波器电感 $L_g/p.u.$	0.15
串补输电线路等效电阻 $R_L/p.u.$	0.02
串补输电线路等效电感 $L_L/p.u.$	0.001 6
串联补偿电容 C_{sc}/mF	10

研究系统的大量特征信息,在电力系统 SSR 的研究中占有重要地位^[11]。

特征值的实部和虚部分别表示系统某种模式的发散速度和谐振角频率。在不同串补度和风速下,反馈线性化抑制策略和 PI 控制策略对 SSCI 的抑制效果如图 2 所示。

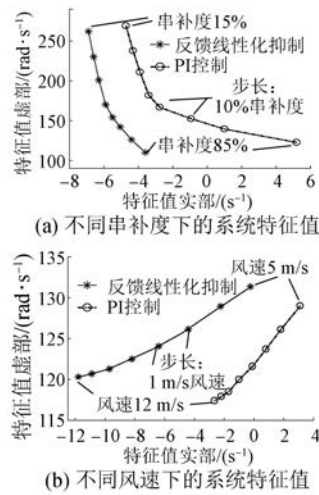


图 2 不同运行条件下的系统特征值

从图 2 可以看出,在 PI 控制下,当串补度大于 75% 或风速低于 8 m/s 时,系统特征值实部为正,表明系统处于不稳定状态;而反馈线性化抑制策略有效地增强了系统阻尼,其对 SSCI 的抑制效果明显优于 PI 控制策略,且在本文研究的运行条件下,无论是低风速还是高串补度,该非线性控制策略都能使系统保持稳定。

由图 2(a)可知系统对 SSCI 的阻尼与输电线

路串补度呈非线性负相关,即串补度越高,系统阻尼越小,且在高串补度条件下,随着串补度的增加,系统阻尼迅速减小。图 2(b)表明,系统阻尼与风速呈正相关。通过对比可以发现,与风速相比,串补度对系统谐振频率影响更大,谐振频率随串补度的减小而显著上升。

3.2 时域仿真分析

时域仿真是电力系统动态稳定分析中最基本的方法之一,其结果通常被视为验证其他方法是否有效、结论是否可靠的一种标准^[11]。使用时域仿真法时,系统所采用的数学模型可以是非线性的,则非常适合双馈风力发电系统非线性与复杂性的特点。

设定风速为 7 m/s,在 $t=1$ s 时投入固定串补电容,串补度为 75%,系统暂态响应如图 3 所示。

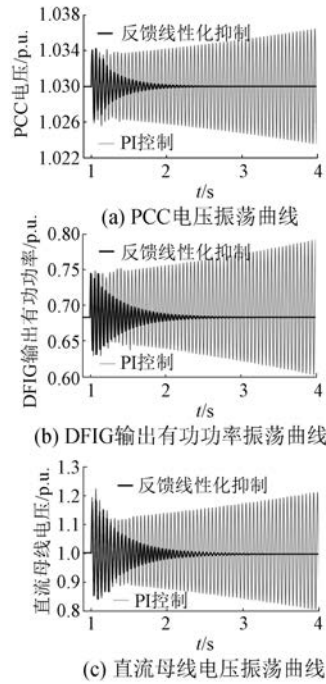


图 3 风速 7 m/s、串补度 75% 时系统暂态响应

由图 3 可以看出,固定串补的突然接入导致 DFIG 输出有功功率和 PCC 处电压均剧烈振荡,SSCI 强烈。反馈线性化控制策略能够有效地抑制 SSCI,使系统恢复稳定;而在 PI 控制下,振荡持续并且发散。这与特征值分析的结论相同。

文献[12]表明,SSCI 抑制措施可能会影响风机控制频带宽度,进而削弱其故障穿越能力。直流母线电压的稳定对 DFIG 的故障穿越有重要影

响,如图 3(c)所示,本文所提非线性控制策略有效抑制直流母线过电压,增强了变流器对故障的承受能力。

设定风速为 7 m/s,在 $t=1$ s 时投入固定串补电容,串补度为 45%,系统暂态响应如图 4 所示。

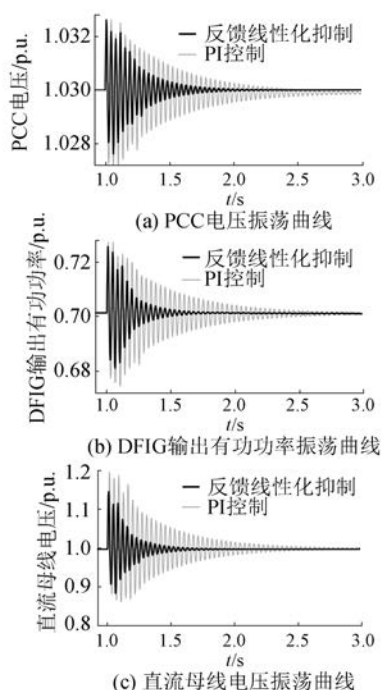


图 4 风速 7 m/s、串补度 45% 时系统暂态响应

由图 4 可知,SSCI 振荡的剧烈程度随串补度的下降而减弱。在该串补度下,两种控制策略皆能抑制 SSCI,但反馈线性化控制策略对 SSCI 和直流母线过电压的抑制效果更好,能够使系统更快地恢复稳定。对比图 3 和图 4 可以发现,系统谐振频率随串补度的下降而明显增大,与特征值分析中图 2(a)的观察结果相一致。

4 结 语

本文提出了基于反馈线性化的控制策略,并将之应用于 DFIG 转子侧变流器和网侧变流器控制回路以抑制 DFIG 经固定串补并网发电时存在的 SSCI。通过特征值分析和时域仿真可以发现,系统对 SSCI 的阻尼与输电线路串补度呈非线性负相关,与风速呈正相关,且串补度对系统谐振频率影响更大。将所提出的控制方法与 PI 控制策略进行比较,仿真结果表明:反馈线性化控制策略不仅在不同风速和串补度下都能有效抑制 SSCI,而且不影响 DFIG 的故障穿越能力。

【参 考 文 献】

- [1] 吴汪平,解大,赵祖熠,等.双馈型风电系统变流器控制参数对振荡模态的影响[J].电机与控制应用,2017,44(7): 98.
- [2] 张剑,肖湘宁,高本锋,等.双馈风力发电机的次同步控制相互作用机理与特性分析[J].电工技术学报,2013,28(12): 142.
- [3] ADAMS J, CARTER C, HUANG S H. ERCOT experience with sub-synchronous control interaction and proposed remediation [C] // Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), IEEE PES, 2012.
- [4] FAN L L, MIAO Z X. Mitigating SSR using DFIG-based wind generation [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(3): 349.
- [5] HUANG P H, MOURS I M S E, XIAO W, et al. Subsynchronous resonance mitigation for series-compensated DFIG-based wind farm by using two-degree-of-freedom control strategy [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1442.
- [6] MOKHTARI M, KHAZAEI J, NAZARPOUR D. Sub-synchronous resonance damping via doubly fed induction generator [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 53: 876.
- [7] 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.
- [8] MAHMUD M A, POTA H R, HOSSAIN M J. Dynamic stability of three-phase grid-connected photovoltaic system using zero dynamic design approach [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2012, 2(4): 564.
- [9] MOHAMMADPOUR H A, SANTI E. Modeling and control of gate-controlled series capacitor interfaced with a DFIG-based wind farm [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 1022.
- [10] LI P H, WANG J, XIONG L Y, et al. Nonlinear controllers based on exact feedback linearization for series-compensated DFIG-based wind parks to mitigate sub-synchronous control interaction [J]. Energies, 2017, 10(8): 1182.
- [11] 肖湘宁,郭春林,高本锋,等.电力系统次同步振荡及其抑制方法[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [12] 梅生伟,申铁龙,刘康志.现代鲁棒控制理论与应用[M].北京:清华大学出版社,2008.

收稿日期: 2018-06-29

携手节能减排 悠享生活空间

让你我从点滴做起



《电机与控制应用》杂志社宣