

基于同伦函数的直驱永磁同步风电机组 次同步振荡特征值分析*

王 淼¹, 赵 峰^{1,2}

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学 光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 为了研究直驱永磁同步风电机组的次同步振荡问题, 建立了典型的风电系统数学模型。在使用传统特征值分析法的基础上, 利用同伦函数代替参与因子法, 准确且直观地辨识出系统振荡模态特征值对应的状态变量。在此基础上进一步分析状态变量对应的参数对系统振荡模态特征值的影响。最后, 通过PSCAD/EMTDC平台进行时域仿真。结果表明: 直流电压控制外环积分系数和电流控制内环比例系数对系统的次同步振荡有很大影响。

关键词: 直驱永磁同步风电机组; 次同步振荡; 特征值分析; 同伦函数

中图分类号: TM 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)09-0089-08

Eigenvalue Analysis on Sub-Synchronous Oscillation of Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Wind Turbine Generator Based on Homotopy Function*

WANG Miao¹, ZHAO Feng^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Intelligent Control, Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to study the sub-synchronous oscillation problem of the direct-drive permanent magnet synchronous wind turbine generator, a typical mathematical model of wind power system was established. Based on the traditional eigenvalue analysis method, the state variables corresponding to the eigenvalues of system oscillation mode were identified intuitively and accurately by using the homotopy function instead of the participation factor method. On this basis, the influence of corresponding parameters of state variables on the eigenvalue of system oscillation mode was further analyzed. Finally, time domain simulation was carried out on the PSCAD/EMTDC platform. The results showed that the outer ring integration coefficient of DC voltage control and the inner ring proportionality coefficient of current control influenced the sub-synchronous oscillation of system greatly.

Key words: direct-drive permanent magnet synchronous wind turbine generator (DDPMSG); sub-synchronous oscillation; eigenvalue analysis; homotopy function

0 引 言

近年来, 以风电为代表的可再生能源发电技术在我国的迅猛发展, 预计到 2020 年, 我

国风电总装机容量将超过 2 亿 kW^[1-2]。在风力发电中, 利用串联补偿技术可以大幅度地提高输电能力, 因此该技术被广泛应用于风电的大规模外送中。串补技术容易诱发风电系统的次同步振

* 基金项目: 光电技术与智能控制教育部重点实验室(兰州交通大学)开放课题(KFKT2016-6)

作者简介: 王 淼(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风电并网系统的安全性与稳定性。

赵 峰(1966—), 男, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向为电能质量分析与控制、电力系统分析。

荡 (Sub-Synchronous Oscillation, SSO) 问题, 进而影响风电机组及风电外送系统的安全稳定运行。之前有关风力发电 SSO 的现象主要发生在利用串补技术输电的双馈风电场, 所以国内外学者的研究也都集中于此。2015 年, 我国新疆哈密地区的一大型直驱风电场在其外送系统没有加串补的情况下出现了严重的次同步振荡现象^[3], 此后一些直驱风电场也相继发生了 SSO 的现象。

目前直驱风电机组引起的 SSO 逐步引起了研究人员的关注。文献[3]利用小信号分析法、阻抗分析法、时域仿真指出直驱风电机组的 SSO 与系统在次同步频率下的弱阻尼有关。文献[4]利用输入导纳法得出直驱风电机组的 SSO 与接入系统的强度有关。文献[5-8]建立了直驱风电机组的小信号模型, 进行了特征值分析, 得出直驱风电机组的 SSO 与网侧变流器 (Grid Side Converter, GSC) 控制器的参数有关。文献[9]利用特征值分析法、阻抗扫描法得出直驱风电机组的 SSO 与风速、风机数量、电网强度等有关。特征值分析法常用于分析非线性动力系统的稳定性, 一般多使用参与因子^[10]来确定系统的状态变量和特征值之间的对应关系, 进而分析出影响系统稳定性的主要因素。目前在 SSO 的机理分析中得到了广泛的应用。然而在使用参与因子时, 须预先设定一门坎值, 但其门坎值的设定并没有明确的限定, 通常只能依靠观察和经验来确定^[11], 将影响特征值分析法的精确度。

利用同伦的概念, 建立同伦函数可以表征系统状态变量和特征值之间的对应关系^[12], 不需像使用参与因子那样事先确定门坎值, 且直观易用。本文首先建立了典型的直驱风电机组数学模型, 然后将同伦函数引入到系统的特征值分析当中, 在此基础上分析出影响振荡模态的主导因素, 最后在 PSCAD/EMTDC 平台上进行时域仿真, 验证分析结果的正确性。

1 直驱风电机组的数学模型

直驱永磁同步风电系统结构示意图如图 1 所示。

直驱风电机组主要由风力机、永磁同步风电机组 (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)、机侧变流器 (Machine-Side Converter,

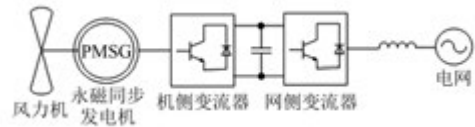


图 1 直驱永磁同步风电系统结构示意图

MSC)、直流环节、GSC 等组成。

1.1 风力机模型

风力机能够将风能转化成机械能。其输出的机械转矩 T_w 为^[13]

$$T_w = \begin{cases} 0, & v_w < v_{in} \\ \frac{\rho}{2} c_p(\lambda, \beta) A_r v_w^3 / \Omega_w, & v_{in} < v_w < v_R \\ P_r / \Omega_w, & v_R < v_w < v_{out} \\ 0, & v_w > v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_w ——风力机输出机械转矩;

v_w ——风速;

v_{in} 、 v_R 、 v_{out} ——风力机切入速度、额定速度和切出速度;

ρ ——空气密度;

A_r ——风力机叶片的扫掠面积;

Ω_w ——风力机机械角速度;

P_r ——风力机额定输出功率;

c_p ——风能利用系数, 通常表示成叶尖速比 λ 和桨距角 β 的函数。

1.2 轴系模型

在分析直驱风电机组的 SSO 问题时, 轴系扭振是重要影响因素之一。常用两质块模型对其动态过程进行描述, 其表达式为^[14]

$$2H_m \frac{d\omega_m}{dt} = T_w - K\theta_s - D(\omega_m - \omega_r) \quad (2)$$

$$2H_e \frac{d\omega_r}{dt} = K\theta_s + D(\omega_m - \omega_r) - T_e \quad (3)$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s(\omega_m - \omega_r) \quad (4)$$

式中: D ——轴系阻尼系数;

K ——轴系刚性系数;

H_m ——风轮机惯性时间常数;

H_e ——发电机惯性时间常数;

ω_m 、 ω_r ——风轮机机械转速、发电机转子转速;

θ_s ——轴系扭转角度;
 ω_s ——定子磁场转速;
 T_e ——PMSG 的电磁转矩。

1.3 桨距角控制系统模型

桨距角控制系统模型用一阶微分方程表示:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{T_{se}}(\beta_0 - \beta) \quad (5)$$

式中: T_{se} ——桨距控制系统的惯性时间常数;

β_0 ——桨距角初始值。

1.4 PMSG 模型

在同步旋转参考坐标系下,定子和转子磁通都被看作是静止的,因此磁链及电感都是恒定的。定子电流的参考方向遵循发电机惯例,在 $d-q$ 坐标系下建立 PMSG 的数学模型^[14]。

定子电压方程为

$$\begin{cases} u_{sd} = \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_r \psi_{sq} - R_s i_{sd} \\ u_{sq} = \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_r \psi_{sd} - R_s i_{sq} \end{cases} \quad (6)$$

定子磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_{sd} = -L_s i_{sd} + \psi_f \\ \psi_{sq} = -L_s i_{sq} \end{cases} \quad (7)$$

发电机输出功率方程为

$$\begin{cases} P_e = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq} \\ Q_e = u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (8)$$

式中: u_{sd} 、 u_{sq} ——定子电压的 d 、 q 轴分量;

i_{sd} 、 i_{sq} ——定子电流的 d 、 q 轴分量;

ψ_{sd} 、 ψ_{sq} ——定子磁链的 d 、 q 轴分量;

R_s ——定子电阻;

L_s ——定子线圈电感;

ψ_f ——永久磁铁穿过转子的磁链。

1.5 MSC 控制模型

MSC 采用转子磁链定向控制技术,其控制目标是:实现 PMSG 有功和无功的解耦控制;对发电机发出的交流电进行整流;实现最大功率点追踪。

MSC 控制框图如图 2 所示^[13]。

MSC 的状态方程为

$$\frac{dX_1}{dt} = P_{\text{eref}} - P_e = \Delta P_e \quad (9)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = K_{p1}(P_{\text{eref}} - P_e) + K_{i1}X_1 - i_{sd} \quad (10)$$

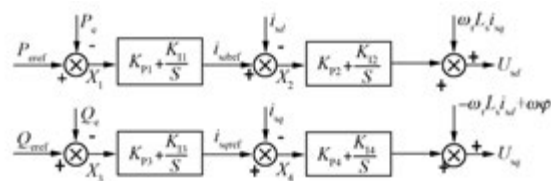


图2 MSC 控制框图

$$\frac{dX_3}{dt} = Q_{\text{eref}} - Q_e = \Delta Q_e \quad (11)$$

$$\frac{dX_4}{dt} = K_{p3}(Q_{\text{eref}} - Q_e) + K_{i3}X_3 - i_{sq} \quad (12)$$

$$U_{sd} = K_{p2}(K_{p1}\Delta P_e + K_{i1}X_1 - i_{sd}) + K_{i2}X_2 + \omega_r L_s i_{sq} \quad (13)$$

$$U_{sq} = K_{p4}(K_{p3}\Delta Q_e + K_{i3}X_3 - i_{sq}) + K_{i4}X_4 + \omega_r L_s i_{sd} + \omega_r \psi \quad (14)$$

式中: X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 ——中间变量;

i_{sdr_ref} 、 i_{sqr_ref} —— d 、 q 轴电流参考量;

P_e 、 Q_e ——PMSG 输出的有功和无功;

P_{eref} 、 Q_{eref} ——有功和无功的参考值;

K_{p1} 、 K_{p2} ——有功控制环节 PI 控制器的比例系数;

K_{p3} 、 K_{p4} ——无功控制环节 PI 控制器的比例系数;

K_{i1} 、 K_{i2} ——有功控制环节 PI 控制器的积分系数;

K_{i3} 、 K_{i4} ——无功控制环节 PI 控制器的积分系数。

1.6 GSC 控制模型

GSC 采用电网电压定向矢量控制技术,其控制目标是:控制直流侧电压稳定;实现网侧功率因数调整;控制与电网交换的无功功率。

GSC 的控制框图如图 3 所示^[13]。

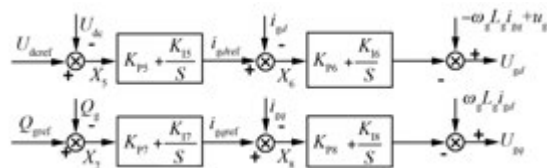


图3 GSC 控制框图

GSC 的状态方程为

$$\frac{dX_5}{dt} = U_{dref} - U_{dc} = \Delta U_{dc} \quad (15)$$

$$\frac{dX_6}{dt} = K_{P5}(U_{dref} - U_{dc}) + K_{I5}X_5 - i_{gd} \quad (16)$$

$$\frac{dX_7}{dt} = Q_{gref} - Q_g = \Delta Q_g \quad (17)$$

$$\frac{dX_8}{dt} = K_{P8}(Q_{gref} - Q_g) + K_{I8}X_8 - i_{gq} \quad (18)$$

$$U_{gd} = K_{P6}(K_{P5}\Delta U_{dc} + K_{I5}X_5 - i_{gd}) + K_{I6}X_6 + \omega_g L_g i_{sq} + u_g \quad (19)$$

$$U_{gq} = K_{P8}(K_{P7}\Delta Q_g + K_{I7}X_7 - i_{gq}) + K_{I8}X_8 - \omega_g L_g i_{sd} \quad (20)$$

式中: X_5, X_6, X_7, X_8 ——中间变量;

U_{dref} ——直流电压参考量;

i_{gd}, i_{gq} ——电网电流的 d, q 分量;

U_{gd}, U_{gq} ——电网电压的 d, q 分量;

Q_g ——网侧无功功率;

P_{gref}, Q_{gref} ——网侧有功功率、无功功率参考值;

ω_g ——电网同步角速度;

L_g ——网侧电抗器电感;

K_{P5}, K_{P6} ——直流电压控制环节 PI 控制器的比例系数;

K_{P7}, K_{P8} ——无功控制环节 PI 控制器的比例系数;

K_{I5}, K_{I6} ——直流电压控制环节 PI 控制器的积分系数;

K_{I7}, K_{I8} ——无功控制环节 PI 控制器的积分系数。

1.7 直流环节数学模型

直流环节的电容充放电过程可描述为

$$C_z U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = (u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}) + u_{gd} i_{gd} \quad (21)$$

式中: C_z ——直流电容。

1.8 小信号模型

联立微分方程式(2)~式(5)、式(9)~式(12)、式(15)~式(18)、式(21)和4个代数方程式(13)、式(14)、式(19)、式(20),在稳态运行点处进行线性化处理,在保留状态变量的基础上,将代数变量消去,可写成:

$$\begin{cases} \Delta \dot{X} = A \Delta X + B \Delta U \\ 0 = C \Delta X + D \Delta U \end{cases} \quad (22)$$

消去式(22)中的代数方程,可得:

$$\Delta \dot{X} = A_s \Delta X \quad (23)$$

式(22)、式(23)中,状态变量 $X = [\beta, \omega_m, \omega_r, \theta_s, X_1, X_2, X_3, X_4, U_{dc}, X_5, X_6, X_7, X_8]^T$, 输入控制向量 $U = [i_{sd}, i_{sq}, i_{gd}, i_{gq}]^T$ 。

系统状态矩阵为

$$A_s = A - BD^{-1}C \quad (24)$$

其中: A, B, C, D 为系数矩阵,其具体形式可参考文献[15]。

$$A_s =$$

$$\begin{bmatrix} -5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.8 & -2.2 & -0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.6 & -1.5 & 1.4 & 5.1 & 0.8 & 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.9 & -2.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.2 & 0 & 0 & -33 & -4.2 & -10 & -2.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.4 & 0 & 0 & -170.2 & -2.2 & -5.2 & -1.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.2 & 0 & 0 & -95.7 & 12.8 & -8.9 & -2.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.5 & 0 & 0 & 472.7 & 63.4 & 55.7 & -10.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -134.5 & 0 & 0 & -3401.5 & -442.6 & -1012 & -275.6 & 0 & -675 & -172 & -3462 & -267 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -69.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 100 & -11.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.6 & -0.6 & -1.4 & -1671.8 & -127.4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.52 & -0.53 & -1.2 & -1135.3 & -94.6 \end{bmatrix}$$

2 特征值分析

特征值分析法又称模态分析法,是控制理论中的基础分析方法之一,可以用于分析除暂态转矩放大作用之外的各种 SSO 问题,目前在 SSO 的研究中已经取得了广泛应用。其判定系统是否稳定的依据是 Lyapunov 稳定性第二定理^[16]。

2.1 系统特征值

直驱永磁同步风电机组 (Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Wind Turbine Generator, DDPMSG) 系统采用 13 阶模型,其主要参数如表 1 所示。设定风速为 13 m/s,在此工况下可以计算得出系统的稳态运行点,进而求得系统状态矩阵 A_s 的具体数值(见上文)。采用特征值分析法,可得系统的特征值、振荡模式的频率和阻尼系数,如表 2 所示。可以看出,系统有 13 个特征值,其中有 3 个振荡模态,分别为 $\lambda_{2,3}$ 、 $\lambda_{9,10}$ 、 $\lambda_{11,12}$ 。振荡模态 λ_2 的振荡频率为 0.414 Hz,属于

表 1 DDPMSG 风电系统参数

参数名称	参数值
空气密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.237
风轮机惯性时间常数 H_m / s	6.2
发电机惯性时间常数 H_e / s	1.0
轴系阻尼系数 $D / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	5×10^3
轴系刚性系数 $K / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	5×10^6
桨距控制系统的惯性时间常数 T_{sc} / s	0.01
发电机的输出功率 P_e / MW	1.5
定子电阻 R_s / Ω	0.028
定子线圈电感 L_s / mH	1.121
发电机极对数 p	48
直流环节电容 C_d / mF	33.2
网侧电抗器电感 L_g / mH	0.22
K_{p1}, K_{i1}	0.5, 200
K_{p2}, K_{i2}	0.3, 8
K_{p3}, K_{i3}	5, 100
K_{p4}, K_{i4}	0.3, 8
K_{p5}, K_{i5}	10, 100
K_{p6}, K_{i6}	2, 100
K_{p7}, K_{i7}	0.73, 86
K_{p8}, K_{i8}	15, 100

表 2 系统特征值

序号	特征值	频率/Hz	阻尼比
λ_1	-85.7	0	1
$\lambda_{2,3}$	$0.4 \pm 2.9j$	0.46	0.14
λ_4	-68.5	0	1
λ_5	-17.9	0	1
λ_6	-13.4	0	1
λ_7	-1.4	0	1
λ_8	-5	0	1
$\lambda_{9,10}$	$-11.7 \pm 53.3j$	8.48	0.21
$\lambda_{11,12}$	$-5.9 \pm 132.1j$	21.03	0.04
λ_{13}	-1 681.8	0	1

低频振荡频率范围,在此不赘述。振荡模态 $\lambda_{9,10}$ 、 $\lambda_{11,12}$ 的振荡频率均在次同步振荡频率范围之内,并且特征值的实部均为负数,所以在当前给定的稳定运行点和参数下振荡呈衰减模式,系统相对稳定^[16]。为了进一步确定状态变量与各振荡模态特征值间的关系,下文将引入同伦函数对其做详细分析。

2.2 用同伦函数确定振荡模态特征值对应的状态变量

在使用特征值分析法时,常用参与因子来分析系统状态变量和特征值的对应关系,进而分析出影响系统稳定性的主要因素。但是常需要为参与因子事先设定门坎值,其门坎值的设定并没有绝对明确的规则,通常只能靠观察和经验来决定^[17]。这将影响特征值分析法的精确度。

同伦函数的定义: X, Y 为给定 2 个拓扑空间。 $f, g: X \rightarrow Y$ 是光滑映射,若存在一个连续映射 $H: X \times [0, 1] \rightarrow Y$ 使得 $\forall x \in X, H(x, 0) = f(x), H(x, 1) = g(x)$, 则称 f 与 g 同伦^[18]。由以上定义可知,所谓同伦客观上描述的是 2 个拓扑空间的等价关系,即 2 个拓扑空间如果可以通过一系列连续的形变从一个变到另一个,那么就称这 2 个拓扑空间同伦。这种连续的形变可以通过同伦函数来实现。

取系统状态矩阵 A_s 的对角线元素,形成新的矩阵 F , 即

$$F = \text{diag}(a_{11}, a_{22}, \dots, a_{nn}) \quad (25)$$

由第 2.1 节中所求得的 A_s 可得:

$$F = \text{diag}(-5, -0.8, -1.5, 0, -33,$$

- 2.2, - 8.9, - 10.6, 0, - 69.6,
- 11.9, - 1 671.8, - 94.6)

假设用 F 代替 A_s 作为该系统的状态矩阵, 即

$$\Delta \dot{X} = F \Delta X \quad (26)$$

由 Lyapunov 稳定性理论可知, 由于 F 为对角矩阵, 每行上只有一个元素, 不存在与其他元素的耦合关系, 所以 F 的第 i 个元素也即特征值就对应系统的第 i 个状态变量^[19]。然而在实际中各状态变量间存在耦合关系, 因此系统特性由系统状态矩阵 A_s 决定。但通过上述同伦函数的概念, A_s 与 F 矩阵的特征值之间在系统模型固定的情况下存在对应关系。

在 A_s 和 F 之间构造如下同伦函数:

$$H(r) = (1 - r)F + rA_s, r \in [0, 1] \quad (27)$$

当 $r=0$ 时, $H(r)$ 的特征值为 F 的特征值; 当 $r=1$ 时, $H(r)$ 的特征值为 A_s 的特征值。 r 取连续足够小的值时, $H(r)$ 特征值的轨迹便反映了由 F 的特征值过渡到 A_s 的特征值的过程, 于是矩阵 A_s 和 F 的特征值便被联系在了一起, 而 F 的特征值与系统状态变量之间关系是确定的, 所以 A_s 的特征值与系统状态变量的对应关系也可以确定。

图 4 所示为在 MATLAB 中计算 $r(r \in [0, 1])$ 取连续值时同伦函数矩阵 $H(r)$ 特征值实部的轨迹, 其中横坐标为同伦函数中的 r 变量, 纵坐标表示矩阵 $H(r)$ 的特征值实部。曲线的起始点对应矩阵 F 的特征值实部, 终止点对应系统状态矩阵 A_s 的 2 个次同步振荡模式特征值 $\lambda_{9,10}$ 、 $\lambda_{11,12}$ 的实部。通过图 4 曲线可确定矩阵 F 的特征值与系统状态矩阵 A_s 的振荡模式特征值之间的对应关系, 进而可以确定出系统状态变量与系统振荡模式特征值之间的对应关系: $\lambda_{9,10}$ 对应 X_6 , $\lambda_{11,12}$ 对应 X_5 。 X_6 为网侧电流控制内环的中间变量, 说明

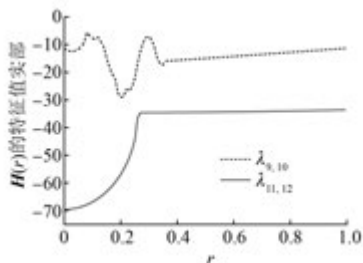


图 4 系统状态矩阵 A_s 与对角矩阵 F 特征值之间的对应关系

$\lambda_{9,10}$ 受此环节的 PI 控制器参数 K_{p6} 、 K_{i6} 的影响。 X_5 为网侧直流电压控制外环的中间变量, 可知 $\lambda_{11,12}$ 与该环节的 PI 控制器参数 K_{p5} 、 K_{i5} 强相关。

3 控制器参数对振荡模式的影响

基于前文分析, 可以得出振荡模式 $\lambda_{9,10}$ 主要受到 PI 控制器参数 K_{p6} 、 K_{i6} 的影响, 而振荡模式 $\lambda_{11,12}$ 主要受到 PI 控制器参数 K_{p5} 、 K_{i5} 的影响。 为了研究以上各 PI 参数变化对系统振荡模式特征值的影响, 在 MATLAB 上建立系统小信号模型, 依次改变各 PI 参数, 保持其他量不变, 可得到振荡模式特征值 $\lambda_{9,10}$ 和 $\lambda_{11,12}$ 的实部 σ 和由虚部所决定的振荡频率 f 随各控制器参数的变化, 分别如图 5~8 所示。

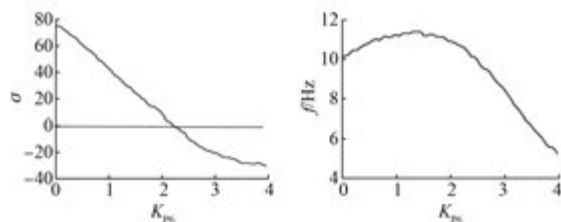


图 5 直流电压控制器比例系数 K_{p6} 对 $\lambda_{9,10}$ 的影响

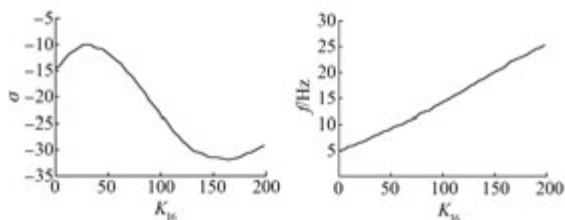


图 6 直流电压控制器积分系数 K_{i6} 对 $\lambda_{9,10}$ 的影响

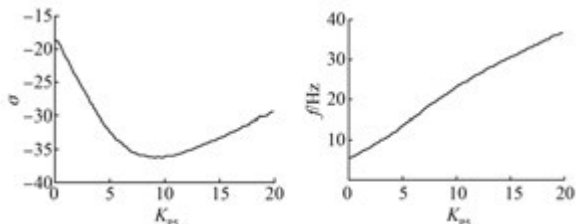
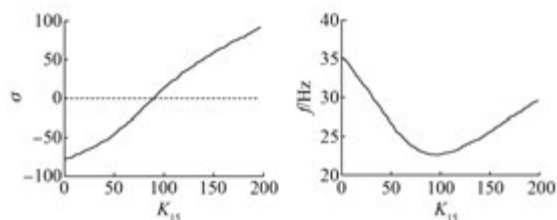


图 7 电流控制器积分系数 K_{p5} 对 $\lambda_{11,12}$ 的影响

可以看出, 当以上控制器参数在其预设值 0.1~2.0 倍变化时, 对振荡模式有较大影响。 其中 K_{p6} 与振荡模式 $\lambda_{9,10}$ 的实部具有负相关性, 当 $K_{p6} < 2$ 时, 实部变为正, 系统对振荡模式由正阻尼作用

图8 电流控制器积分系数 K_{i5} 对 $\lambda_{11,12}$ 的影响

变为负阻尼作用,有可能激发不稳定的振荡模态^[20]; K_{i5} 与振荡模态 $\lambda_{11,12}$ 的实部具有正相关性,当 $K_{i5} > 100$ 时,实部变为正,此振荡模态将可能转变为不稳定振荡模态; K_{i6} 和 K_{i5} 均与其对应的振荡模态的频率呈正相关。

4 仿真验证

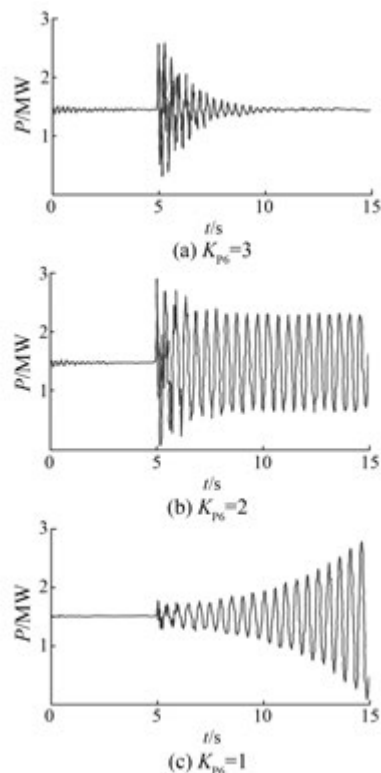
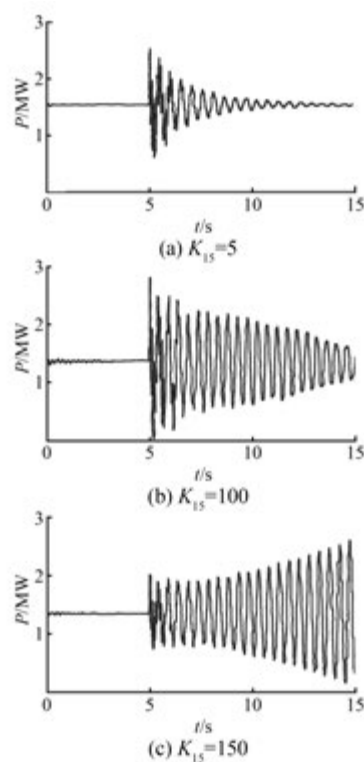
为了进一步验证上述特征值分析的结果,在 PSCAD/EMTDC 搭建 DDPMSG 的仿真模型。由于在低风速的运行条件下容易引起系统次同步振荡^[3-4],因此首先保持初始风速 13 m/s 不变,待系统稳定运行后将风速跃变为 6 m/s,其余参数均与小信号模型的参数一致,在此工况下观察控制器参数对次同步振荡的影响。本文在开始仿真 5 s 后改变风速,系统进入振荡模式,依次改变各 PI 参数,保持其他变量不变,得到不同参数值下有功功率 P 的振荡曲线,如图 9、图 10 所示。

从图 9 可看出,当风速在 5 s 时变为 6 m/s 后,系统的有功功率开始振荡,并且随着 K_{p6} 的减小,振荡加剧,在 $K_{p6} = 1$ 时,振荡开始发散。由图 10 可以看出,随着 K_{i5} 的增大,振荡加剧,在 $K_{i5} = 150$ 时,振荡开始发散。这与上文中控制器参数对振荡模态特征值的影响分析结果一致。

5 结 语

(1) 本文建立了详细的 DDPMSG 的小信号模型,通过求解其状态矩阵的特征值,可知系统存在 2 个次同步振荡模态,且其特征值实部均为负,因此在当前给定的稳定工作点和参数下振荡呈衰减模式,系统是相对稳定的。

(2) 使用同伦函数可直观地辨识出直驱风电系统的 2 个 SSO 模态特征值对应的状态变量,为下一步深入研究状态变量对振荡模态的影响奠定了基础。

图9 不同 K_{p6} 时有功功率 P 的振荡曲线图10 不同 K_{i5} 时有功功率 P 的振荡曲线

(3) 通过理论分析和仿真验证得出, GSC 的电流控制内环 PI 控制器比例系数 K_{p6} 越大, SSO 模态的特征值实部越小, 振荡频率越低, 系统越趋于稳定; GSC 的电压控制外环 PI 控制器积分系数 K_{i5} 越大, SSO 模态的特征值实部越大, 振荡频率在一定范围内越高, 系统越趋于不稳定。

【参考文献】

- [1] 2012年中国风电装机容量统计[R].北京: 中国风能协会, 2012.
- [2] 国家能源局. 风电发展“十二五”规划[A]. 2012.
- [3] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2366-2372.
- [4] 宋瑞华, 郭剑波, 李柏青, 等. 基于输入导纳的直驱风电次同步振荡机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4662-4670.
- [5] 刘为杰, 姜建国. 直驱永磁同步风电机组次同步振荡建模与分析[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(1): 97-103.
- [6] 刘严, 袁越, 傅质馨. 直驱永磁风电场并网运行的小干扰稳定性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(5): 1-6.
- [7] CHOUKET M, KRICHEN L. Small signal modeling and stability analysis of wind turbine with PMSG connected to the grid [C]//International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices, IEEE, 2015: 1-8.
- [8] 谭瑾, 王晓茹, 陈哲. 并网永磁直驱式风电系统的模态分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013(17): 49-55.
- [9] 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): 4708-4720.

- [10] 彭谦, 马晨光, 杨雪梅, 等. 线性模态分析中的参与因子与贡献因子[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 92-96.
- [11] 张艳萍. 受端系统小扰动电压稳定问题的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [12] 武志刚, 张尧, 郑风雷, 等. 电力系统特征值与状态变量对应关系分析[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(10): 23-26.
- [13] 蔺红, 晁勤. 直驱永磁同步风力发电系统的降阶模型研究[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 145-151.
- [14] 关宏亮. 大规模风电场接入电力系统的小干扰稳定性研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.
- [15] 蔺红. 直驱式风电场动态等值建模研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2012.
- [16] SHI L B, SU J L, YAO L Z. SS resonance analysis of complex power system incorporating wind power[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(3): 305-312.
- [17] JIN Z, WU Q. Using power-law degree distribution to accelerate PageRank [J]. Computer Engineering & Applications Journal, 2012, 1(1): 63-70.
- [18] 伍济开. 含风电场的电力系统频率稳定的同伦函数分析法[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- [19] 刘红. 同伦方法求解广义特征值问题[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2008.
- [20] BI T, LI J, ZHANG P, et al. Study on response characteristics of grid-side converter controller of PMSG to sub-synchronous frequency component[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(7): 966-972.

收稿日期: 2018-03-12

(上接第 88 页)

- [12] WANG S, HU J B, YUAN X M. 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.
- [13] WANG S, HU J B, YUAN X M. On inertial dynamics of virtual-synchronous-controlled DFIG-based wind turbines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(4): 1691-1702.
- [14] MENG W C, YANG Q M, SUN Y X. Adaptive neural control of nonlinear MIMO systems with time-varying

output constraints [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2017, 26(5): 1074-1085.

- [15] MENG W C, YANG Q M, SUN Y X. Guaranteed performance control of DFIG variable-speed wind turbines [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(6): 2215-2223.
- [16] 贺益康, 胡家兵, 徐烈. 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

收稿日期: 2018-03-26