

# PI 控制器参数对并网永磁直驱型风力发电系统 机网相互作用的影响

吴汪平<sup>1</sup>, 楚皓翔<sup>1</sup>, 解 大<sup>1</sup>, 张延迟<sup>2</sup>, 王西田<sup>1</sup>, 李国杰<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 电气工程系 电子信息与电气工程学院, 上海 200240;

2. 上海电机学院 电气学院, 上海 200240)

**摘要:** 为了研究并网永磁直驱型风力发电(PMSG)系统的振荡问题,建立了基于PQ解耦控制的PMSG系统的小信号模型。用特征值分析法和相关因子分析方法,找出了系统所有的振荡模态、特征频率和主导每种振荡模态的状态变量,并用基于Copula理论的分布估计算法寻找最优的PI控制器参数组合。通过MATLAB/Simulink平台进行时域仿真,验证了各种振荡模态的存在。在不改变系统稳定性的前提下,依次改变变流器的控制参数,研究了系统的次同步控制相互作用、次同步振荡和低频振荡模态的变化情况。利用最佳PI控制器参数对所建PMSG系统模型进行模态分析,仿真结果验证了所提模型的正确性。

**关键词:** 永磁直驱风力发电; 控制参数; 次同步相互作用; 次同步振荡; 低频振荡; 分布估计算法

**中图分类号:** TM 614

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.10.004

## 0 引言

随着环境、能源问题的日益严峻,可再生资源的开发利用已然成为国际热点,其中风力发电技术发展迅猛<sup>[1-2]</sup>。在不同的风力发电系统中,变速风力发电机具有能量生产效率高和扭矩峰值低的特点,获得了广泛好评<sup>[3]</sup>。变速风力发电机可以通过调节转轴的速度,使风电系统运行于最大功率点,从而获取最大的风能<sup>[4]</sup>。直驱型风力发电机在功率密度、效率和可靠性等方面具有优势,完美契合了变速风电系统的运行模式。同时,永磁直驱型风力发电(PMSG)系统能够省略齿轮箱,节约了建造、运行和维护费用<sup>[5]</sup>,吸引了风力发电机制造商的注意<sup>[6]</sup>。

目前并网型风电场的规模不断扩大,风电场异常运行的事件越来越多<sup>[7-8]</sup>。研究发现,风电场与电网之间的相互作用多表现为有功功率的振荡,且对应的振荡频率低于系统工频,与此同时,大规模风电机组出现脱网事故<sup>[9]</sup>。对此,已有众多学者对PMSG系统的振荡问题进行了研究。文献[10]研究了风电场的非线性模型,并建立了可用于电力系统暂态分析的小信号模型。文献[11]建立了适用于系统小扰动稳定分析的PMSG系统模型,研究了并网风力发电机无穷大系统的模式特性;采用特征值法分析了轴系模型、轴系刚性参数、运行点、并网

距离对并网风电系统模式的影响;并在PSCAD/EMTDC上建立了相应的非线性模型,利用Prony方法对输出功率曲线进行模式识别,验证了模态分析结论。文献[12]提出了阻尼控制和峰值功率追踪方案以抑制永磁风电系统的振荡。文献[13]阐述了次同步控制相互作用(SSCI)问题的由来,总结了不同类型风力发电机组的SSCI特性,分析了SSCI的发生机理、参数特性,探讨了SSCI的分析方法及抑制措施。文献[14]利用频率扫描法和特征值分析法对影响SSCI的状态变量进行研究。次同步振荡(SSO)频率与轴系的自然频率接近时,会引发轴系的扭振,长期存在的SSO对系统也是有害的<sup>[15]</sup>。文献[16]建立了典型PMSG系统接入交流电网的等值系统模型,通过电磁暂态仿真、阻抗模型和小信号分析研究SSO产生的机理;分析接入交流电网强弱、风力发电机出力、并网风力发电机台数、风力发电机控制参数及动态无功补偿设备对振荡特性的影响。低频振荡表现为功率的振荡,该振荡频率较低,一般为0.1~2 Hz,主要由电机的转子出现与其他机组的相对摇摆导致,该振荡模态与励磁系统的弱阻尼相关<sup>[17]</sup>。文献[18]提出一种综合系统惯性和阻尼控制的PMSG系统稳定器(PSS)控制方案,通过在高风电渗透率电网仿真模型中搭建该控制模块,模拟分析该方案的有效性。在2区域4机系统中进行了时域仿真,结果显示该PSS能有效抑制电网低频振荡。文献[19]提出了粒子群优化算法用于研究PMSG系统的PI控制器参数,以提高系统稳定性。目前缺少以研究系统小扰动稳定性为前提的PMSG系统建模研究,且并网PMSG系统的PI控制器参数对系统振荡问题的影响还缺少系统研究。

本文首先建立了基于AC/DC/AC变流器PQ

收稿日期:2016-07-27;修回日期:2017-08-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277119,51477098);  
国家电网公司科技项目(电压源型换流器群及其与电网间振荡  
的机理与抑制方法研究)(5442NY160025)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277119,51477098) and Science and Technology Project of SGCC(Oscillation Mechanism Analysis and Control in a Complex Power Network Containing Clusters of Voltage-source Based Converters)(5442NY160025)

解耦控制的 PMSG 系统的小信号模型。然后,通过特征值分析法找出 PMSG 系统的振荡模态。根据相关因子表,研究机网相互作用的振荡模态情况,并通过时域仿真验证相应模态的存在。然后,研究变流器的 PI 控制器参数对各种振荡模态的影响情况。最后,采用基于 Copula 理论的分布估计算法寻找最优的 PI 控制器参数组合,并将其代入建立的并网 PMSG 系统模型中,观察振荡模态的变化情况。

## 1 PMSG 系统模型

图 1 为并网 PMSG 系统拓扑结构。风力发电机直接与永磁同步电机相连,电机输出功率经变流器、输电线路连接至无穷大电力系统,其中变流器是由 PWM 整流器、逆变器组成的 AC/DC/AC 变流器。

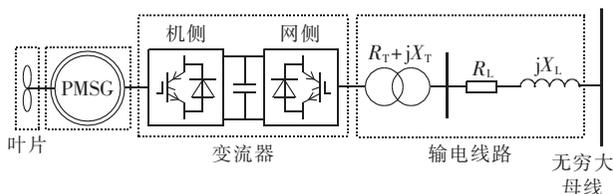


图 1 并网 PMSG 系统拓扑结构

Fig.1 Topology structure of grid-connected PMSG system

PMSG 的机侧变流器采用 PQ 解耦控制策略时,变流器控制如图 2 所示。图中, $\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4, \dot{x}_5, \dot{x}_6$  为选定的状态变量; $K_{p1}, K_{i1}$  为机侧电流  $q$  轴分量 PI 控制器参数; $K_{p2}, K_{i2}$  为机侧电流  $d$  轴分量 PI 控制器参数; $K_{p3}, K_{i3}$  为网侧直流电压 PI 控制器参数; $K_{p4}, K_{i4}$  为网侧电流  $d$  轴分量 PI 控制器参数; $K_{p5}, K_{i5}$  为网侧无功 PI 控制器参数; $K_{p6}, K_{i6}$  为网侧电流  $q$  轴分量 PI 控制器参数; $i_{qs}, i_{qs\_ref}$  分别为机侧变流器电流  $q$  轴分量及其参考值; $u_{qs}$  为机侧变流器电压  $q$  轴分量; $i_{ds}, i_{ds\_ref}$  分别为机侧变流器电流  $d$  轴分量及其参考值; $u_{ds}$  为机侧变流器电压  $d$  轴分量; $u_{dc\_ref}, Q_{g\_ref}, i_{dg\_ref}, i_{qg\_ref}$  分别为网侧直流电压、无功、电流  $d$  轴分量、电

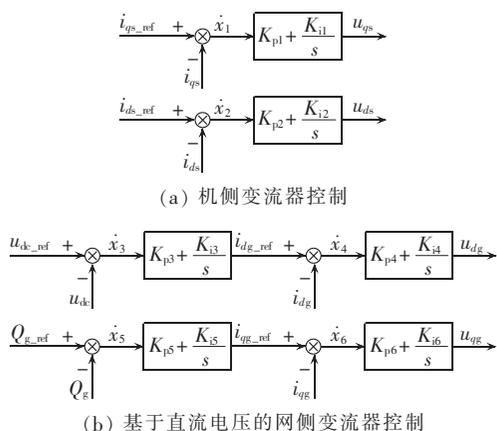


图 2 机侧 PQ 解耦的 PMSG 机组变流器控制

Fig.2 Converter control of PMSG unit with PQ decoupling control in generator-side

流  $q$  轴分量参考值; $u_{dg}, u_{qg}$  分别为网侧电压的  $d, q$  轴分量。网侧变流器主要维持直流侧电容两端电压的恒定,并实现发电机输出有功和无功的最优控制。机侧整流器采用三相桥式 6 脉冲全波整流电路,以同步发电机组仅输出有功功率而不输出无功功率为控制目标。因此机侧整流器的输入为  $d$  轴参考电流  $\Delta i_{ds\_ref}$  和发电机输出的电磁转矩  $\Delta T_e, \Delta i_{ds\_ref}$  和由  $\Delta T_e$  得到的  $\Delta i_{qs\_ref}$  与实际  $d, q$  轴的电流偏差,经机侧整流器中的 PI 控制器调节后可得到目标电压  $\Delta U_{ds}, \Delta U_{qs}$ , 即输出电压  $\Delta U_s$  的  $d$  轴分量、 $q$  轴分量。

基于 AC/DC/AC 变流器 PQ 解耦控制的 PMSG 系统的小信号模型如图 3 所示。图中, $\Delta T_w$  为风力发电机叶轮部分受风产生的机械扭矩微增量; $\Delta \omega_r$  为  $\Delta T_w$  和  $\Delta T_e$  共同作用在轴系部分得到的角速度微增量; $\Delta U_s$  为机侧整流器输出的参考电压微增量; $\Delta I_s$  为永磁发电机模型的输出电流微增量; $\Delta U_g$  和  $\Delta I_L$  分别为风电机组的母线电压和输出电流微增量; $\Delta U_b$  为无穷大电网电压微增量; $\Delta U_{DC}, \Delta U_{DC\_ref}$  分别为网侧直流输入电压及参考值的微增量; $\Delta Q_{g\_ref}$  为网侧无功注入值的微增量。

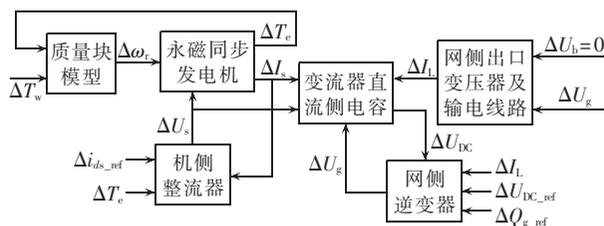


图 3 机侧 PQ 解耦的 PMSG 机组小信号模型

Fig.3 Small-signal model of PMSG unit with PQ decoupling control in generator-side

由图 3 可得,机侧整流器采用 PQ 解耦控制策略的 PMSG 小信号模型的状态空间表达式为:

$$\dot{\Delta X}_{\text{PMSG}} = \mathbf{A}_{\text{PMSG}} \Delta X_{\text{PMSG}} + \mathbf{B}_{\text{PMSG}} \Delta \mathbf{u}_{\text{PMSG}} \quad (1)$$

$$\Delta X_{\text{PMSG}} = [\Delta X_M \quad \Delta X_G \quad \Delta X_{\text{GSR}} \quad \Delta X_{\text{DC}} \quad \Delta X_{\text{CSI}} \quad \Delta X_{\text{RLC}}]^T$$

$$\Delta \mathbf{u}_{\text{PMSG}} = [\Delta T_w \quad \Delta i_{ds\_ref} \quad \Delta U_{\text{DC\_ref}} \quad \Delta Q_{g\_ref} \quad \Delta U_b]^T$$

$$\mathbf{A}_{\text{PMSG}} = \begin{bmatrix} A_M & A_{G\_M} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{M\_G} & A'_G & A_{\text{CSR\_G}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{G\_GSR} & A_{\text{GSR}} & A_{\text{DC\_GSR}} & 0 & 0 \\ A_{M\_DC} & A_{G\_DC} & A_{\text{GSR\_DC}} & A'_{\text{DC}} & A_{\text{CSI\_DC}} & A_{\text{RLC\_DC}} \\ 0 & 0 & 0 & A_{\text{DC\_CSI}} & A_{\text{CSI}} & A_{\text{RLC\_CSI}} \\ 0 & 0 & 0 & A_{\text{DC\_RLC}} & A_{\text{CSI\_RLC}} & A'_{\text{RLC}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \omega_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_b \\ -\frac{k_{12}}{2H_1} & \frac{k_{12}}{2H_1} & -\frac{D_1 + D_{12}}{2H_1} & \frac{D_{12}}{2H_1} \\ \frac{k_{12}}{2H_2} & -\frac{k_{12}}{2H_2} & \frac{D_{12}}{2H_2} & -\frac{D_2 + D_{12}}{2H_2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{\text{GSI}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{i3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{i5} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{\text{DC\_RLC}} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{p3}K_{p4}\omega_b}{x} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{\text{G\_M}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{3n_{\text{pp}}\psi_{\text{PM}}}{4H_1L_{\text{qs}}} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{\text{M\_G}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \psi_{\text{qs}0} + L_{\text{qs}}i_{\text{ds}0} \\ 0 & 0 & 0 & \psi_{\text{PM}} + \psi_{\text{ds}0} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}'_{\text{G}} = \begin{bmatrix} -K_{p2}/L_{\text{ds}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{\text{DC\_GSI}} = [-1 \quad -K_{p3} \quad 0 \quad 0]$$

$$\mathbf{A}_{\text{G\_GSR}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1/L_{\text{ds}} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{\text{DC\_GSR}} = [0]_{2 \times 1}, \mathbf{A}_{\text{GSR}} = [0]_{2 \times 2}$$

$$\mathbf{A}_{\text{M\_DC}} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad -L_{\text{qs}}i_{\text{ds}0}^2 - \psi_{\text{PM}}i_{\text{qs}0}]$$

$$\mathbf{A}_{\text{GSR\_G}} = \begin{bmatrix} 0 & -K_{i2} \\ -K_{i1} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{A}'_{\text{DC}} = [-K_{p3}K_{p4}i_{\text{dg}0}]$$

$$\mathbf{A}_{\text{G\_DC}} = \begin{bmatrix} \frac{\omega_b L_{\text{ds}} i_{\text{qs}0} - (K_{p2} - R_s) i_{\text{ds}0} - u_{\text{ds}0}}{L_{\text{ds}}} & \frac{R_s i_{\text{qs}0} - \omega_b L_{\text{qs}} i_{\text{ds}0} - u_{\text{qs}0}}{L_{\text{qs}}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{\text{GSR\_DC}} = [K_{i1}i_{\text{qs}0} \quad K_{i2}i_{\text{ds}0}]$$

$$\mathbf{A}_{\text{GSI\_DC}} = \begin{bmatrix} K_{p4}K_{i3}i_{\text{dg}0}[K_{p5}K_{p6}i_{\text{qg}0}^2/(1+K_{p5}K_{p6}u_{\text{qg}0})+1] \\ K_{i4}i_{\text{dg}0}[K_{p5}K_{p6}i_{\text{qg}0}^2/(1+K_{p5}K_{p6}u_{\text{qg}0})+1] \\ K_{p5}K_{i5}i_{\text{qg}0}/(1+K_{p5}K_{p6}u_{\text{qg}0}) \\ K_{i6}i_{\text{qg}0}/(1+K_{p5}K_{p6}u_{\text{qg}0}) \end{bmatrix}^{\text{T}}$$

$$\mathbf{A}_{\text{RLC\_DC}} = \begin{bmatrix} -K_{p3}i_{\text{dg}0} - \frac{K_{p5}K_{p6}u_{\text{qg}0}i_{\text{qg}0}}{1+K_{p5}K_{p6}u_{\text{qg}0}} + u_{\text{dg}0} \\ \frac{(K_{p5}u_{\text{dg}0}-1)K_{p6}i_{\text{qg}0}}{1+K_{p5}K_{p6}u_{\text{qg}0}} + u_{\text{qg}0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\text{T}}$$

$$\mathbf{A}_{\text{RLC\_GSI}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ -u_{\text{qg}0} & u_{\text{dg}0} & 0 & 0 \\ -K_{p5}u_{\text{qg}0} & K_{p5}u_{\text{dg}0} - 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}'_{\text{RLC}} = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 & -\omega_b/x & 0 \\ Y_3 & Y_4 & 0 & -\omega_b/x \\ -\omega_b x_c & 0 & 0 & \omega_b \\ 0 & -\omega_b x_c & -\omega_b & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{\text{GSI\_RLC}} = \begin{bmatrix} \omega_b K_{i3} K_{p4} / x & \omega_b K_{i4} / x & 0 & 0 \\ Y_5 Y_6 K_{i3} K_{p4} & Y_5 Y_6 K_{i4} & Y_5 K_{p5} K_{i5} & Y_5 K_{i6} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Y_1 = \frac{\omega_b}{x} (-r - K_{p5}K_{p6}u_{\text{qg}0})$$

$$Y_2 = \omega_b \left[ 1 + \frac{(K_{p5}u_{\text{dg}0}-1)K_{p6}}{x} \right]$$

$$Y_3 = -\omega_b \left[ 1 + \frac{K_{p5}K_{p6}u_{\text{qg}0}}{x(1+K_{p5}K_{p6}u_{\text{qg}0})} \right]$$

$$Y_4 = \frac{\omega_b}{x} \left[ \frac{(K_{p5}u_{\text{dg}0}-1)K_{p6}}{1+K_{p5}K_{p6}u_{\text{qg}0}} - r \right]$$

$$Y_5 = \omega_b / [(1+K_{p5}K_{p6}u_{\text{qg}0})x]$$

$$Y_6 = K_{p5}K_{p6}i_{\text{qg}0}$$

其中,  $\Delta \mathbf{X}_{\text{PMSG}}$ 、 $\mathbf{A}_{\text{PMSG}}$ 、 $\mathbf{B}_{\text{PMSG}}$  和  $\Delta \mathbf{u}_{\text{PMSG}}$  分别为小信号模型的状态向量(17×1 阶)、系统矩阵(17×17 阶)、输入矩阵(17×5 阶)和输入向量(5×1 阶);下标 0 表示运行稳态点的值; $\omega_b$  为系统基准频率; $H_1$ 、 $H_2$  分别为质量块 1、2 的惯性常数; $D_1$ 、 $D_2$  分别为质量块 1、2 的自阻尼系数; $k_{i2}$  和  $D_{i2}$  分别为质量块 1 与 2 之间的刚度系数和互阻尼系数; $L_{\text{ds}}$  为定子  $d$  轴电感; $L_{\text{qs}}$  为定子  $q$  轴电感; $\psi_{\text{PM}}$  为转子永磁体磁链的幅值; $n_{\text{pp}}$  为发电机极对数; $x$  为线路的电感; $\psi_{\text{ds}0}$  为稳态时定子  $d$  轴磁链; $\psi_{\text{qs}0}$  为稳态时定子  $q$  轴磁链。

## 2 PMSG 系统机网相互作用分析

### 2.1 特征值分析

由于在采用“背靠背”型全功率变流器后,机侧整流器的控制环节中包含 2 个 PI 控制器,因此该小信号系统依然有 17 个状态变量,即:

$$\Delta \mathbf{X}_{\text{PMSG}} = [\Delta \theta_1, \Delta \theta_2, \Delta \omega_1, \Delta \omega_2, \Delta \psi_{\text{ds}}, \Delta \psi_{\text{qs}}, \Delta x_1, \Delta x_2,$$

$$\Delta u_{\text{DC}}, \Delta x_3, \Delta x_4, \Delta x_5, \Delta x_6, \Delta i_{\text{Lx}}, \Delta i_{\text{Ly}}, \Delta u_{\text{cx}}, \Delta u_{\text{cy}}] \quad (2)$$

其中,  $\Delta \theta_i$  和  $\Delta \omega_i$  ( $i=1,2$ ) 分别为质量块  $i$  的机械旋转角微增量和角速度微增量; $\Delta \psi_{\text{ds}}$  和  $\Delta \psi_{\text{qs}}$  分别为发电机  $d$  轴和  $q$  轴磁链微增量; $\Delta x_1$  和  $\Delta x_2$  为机侧变流器控制系统变量微增量; $\Delta x_3$ 、 $\Delta x_4$ 、 $\Delta x_5$ 、 $\Delta x_6$  为网侧变流器控制系统变量微增量; $\Delta i_{\text{Lx}}$ 、 $\Delta i_{\text{Ly}}$  分别为电感电流的  $x$  轴分量、 $y$  轴分量微增量; $\Delta u_{\text{cx}}$ 、 $\Delta u_{\text{cy}}$  分别为串补电容电压  $x$  轴分量、 $y$  轴分量的微增量。利用 MATLAB 搭建 PMSG 系统小信号模型进行仿真分析,变流器控制参数如下: $K_{p1}=5$ ,  $K_{p2}=2$ ,  $K_{p3}=0.05$ ,  $K_{p4}=6.5$ ,  $K_{p5}=0.04$ ,  $K_{p6}=20$ ,  $K_{i1}=10$ ,  $K_{i2}=0.03$ ,  $K_{i3}=20$ ,  $K_{i4}=50$ ,  $K_{i5}=1$ ,  $K_{i6}=1$ 。系统全部特征值见表 1。

表 1 PMSG 机组的特征值

Table 1 Eigenvalues of PMSG unit

特征值	数值	振荡频率/Hz	阻尼比
$\lambda_{1,2}$	-229.81 ± j 448.96	71.4540	0.4556
$\lambda_{3,4}$	-128.39 ± j 240.20	38.2284	0.4714
$\lambda_{5,6}$	-0.3054 ± j 47.5366	7.5657	0.0064
$\lambda_{7,8}$	-0.0356 ± j 11.7516	1.8703	0.0030
$\lambda_9$	-7.6412	0	1
$\lambda_{10}$	-0.3080	0	1
$\lambda_{11}$	-0.0720	0	1
$\lambda_{12}$	-1.1601	0	1
$\lambda_{13}$	-0.8734	0	1
$\lambda_{14,15}$	-0.1885 ± j 0.8475	0.1349	0.2171
$\lambda_{16}$	-7.2608 × 10 <sup>-13</sup>	0	1
$\lambda_{17}$	-8.3613 × 10 <sup>-5</sup>	0	1

由表 1 可以看出,系统 17 个特征值的实部全部小于 0,因此机侧整流器采用 PQ 解耦控制策略后,系统仍然是小干扰稳定的。系统共有 5 对共轭复根,对应 5 种振荡模态,剩余的 7 个虚部为 0 的负实根对应 7 种非振荡模态。本文不讨论 7 种非振荡模态,仅分析 5 种振荡模态。为确定与各振荡模态相关度较高的状态变量,计算 5 种振荡模态关于各状态变量的相关因子,见表 2。对各种振荡模态影响较大的相关因子在表 2 中加粗标出。

表 2 PMSG 机组的相关因子

Table 2 Correlation factors of PMSG unit

状态变量	相关因子				
	$\lambda_{1,2}$	$\lambda_{3,4}$	$\lambda_{5,6}$	$\lambda_{7,8}$	$\lambda_{14,15}$
$\Delta\theta_1$	0	0	0	0.053 5	0
$\Delta\theta_2$	0	0	0	<b>0.4788</b>	0
$\Delta\omega_1$	0	0	0	0.053 5	0
$\Delta\omega_2$	0	0	0	<b>0.4465</b>	0
$\Delta\psi_{ds}$	0	0	0	0	<b>0.5122</b>
$\Delta\psi_{qs}$	0	0	0	0.032 3	0
$\Delta i_{Lx}$	<b>0.6899</b>	0.025 6	0.052 7	0	0
$\Delta i_{Ly}$	<b>0.7324</b>	0.078 6	0.040 2	0	0
$\Delta u_{cx}$	0.033 6	<b>0.5092</b>	0.022 4	0	0
$\Delta u_{cy}$	0.064 0	<b>0.5510</b>	0.025 7	0	0
$\Delta U_{DC}$	0.038 4	0.027 0	<b>0.4693</b>	0	0
$\Delta x_1$	0	0	0	0	<b>0.5122</b>
$\Delta x_2$	0	0	0	0	0
$\Delta x_3$	0.027 8	0.023 6	<b>0.4703</b>	0	0
$\Delta x_4$	0.001 5	0	0.001 2	0	0
$\Delta x_5$	0	0	0	0	0
$\Delta x_6$	0	0	0	0	0

## 2.2 电网相互作用模态分析

### a. SSCI。

$\lambda_{1,2}$  对应的振荡频率为 71.454 0 Hz,由输电线路电感电流的  $x$  轴分量和  $y$  轴分量主导,此外,串补电容电压的  $x$  轴分量和  $y$  轴分量对其也有一定的影响(相关因子分别为 0.033 6 和 0.064 0),变流器直流侧电容的电压和网侧逆变器的直流电压控制环节与该模态也有一定的关系; $\lambda_{3,4}$  对应的振荡频率为 38.228 4 Hz,由输电线路串补电容电压的  $x$  轴分量和  $y$  轴分量主导,同时,输电线路电感电流的  $x$  轴分量和  $y$  轴分量对其也有一定的影响(相关因子分别为 0.025 6 和 0.078 6),变流器直流侧电容电压和网侧逆变器的直流电压控制环节与该模态也有一定关系。这表明  $\lambda_{1,2}$  和  $\lambda_{3,4}$  对应的振荡模态是由含串补电容的输电线路、变流器直流电容及网侧逆变器的控制系统共同作用所产生的谐振,属于 SSCI。

$\lambda_{5,6}$  对应的振荡频率为 7.565 7 Hz,由变流器直流侧电容的电压和网侧逆变器直流电压控制外环主导,同时与含串补电容的输电线路和网侧逆变器直流电容控制环节的电流控制内环也有一定关系(相关因子依次为 0.052 7、0.040 2、0.022 4、0.025 7

和 0.001 2)。因此,该振荡模态也是输电线路、变流器直流侧电容和逆变器的控制系统之间相互作用产生的谐振,也属于 SSCI。

### b. SSO。

$\lambda_{7,8}$  对应的振荡频率为 1.870 3 Hz,由表 2 可见,发电机转子的机械扭转角和角速度对其影响较大,且风力发电机的机械扭转角和角速度对其也有一定的影响(相关因子均为 0.053 5),这表明  $\lambda_{7,8}$  是 PMSG 机械轴系的固有扭振频率,是机械振荡模态。此外,该振荡模态还与发电机的  $q$  轴磁链有一定的关系(相关因子为 0.032 3),而系统中的其他部分对该模态没有影响,表明“背靠背”型全功率变流器将发电机组与电网有效隔离开,使两者之间具有一定的独立性。

### c. 低频振荡。

$\lambda_{14,15}$  对应的振荡频率为 0.134 9 Hz,由发电机的  $d$  轴磁链和机侧整流器的控制系统主导(相关因子均为 0.512 2),而与系统的其他部分之间没有关系,因此该振荡模态是单机系统的发电机与机侧整流器控制系统相互作用产生的低频振荡模态。

## 2.3 基于 Copula 理论的分布估计算法

本文所建 PMSG 的小信号模型涉及多组 PI 控制器参数,不同组的 PI 控制器参数间也存在相互耦合的问题。为了解决多变量相关的寻优问题,本文采用基于 Copula 理论的分布估计算法,主要包括优势群体选择、概率分布模型估计和根据估计的模型采样 3 个步骤。

分布模型为了优化变量的联合分布,可以利用 Sklar 定理对群体的分布模型进行估计。为了产生服从联合分布  $H(x_1, x_2, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n))$  的个体,首先生成服从联合分布  $C$  的  $[0, 1]^n$  空间中的点  $(u_1, u_2, \dots, u_n)$ ,然后依据边缘分布函数  $F_i (i=1, 2, \dots, n)$  的反函数  $F_i^{-1}$  计算获得  $x_i$  的值,此时  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  就为根据估计的概率模型  $H$  采样而获得的新个体。

基于 Copula 理论的分布估计算法的基本流程如图 4 所示。在搜索空间中,采取均匀分布的方式产生规模为  $P_s$  的初始群体,随后分别执行以下步骤直至达到终止条件。

a. 选择优势群体。基于设定的、符合适应值的选择策略,选择  $s$  个个体来组成新的优势群体,记为:

$$x = \{x^i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}), i=1, 2, \dots, s\} \quad (3)$$

b. 估计边缘分布函数。优势群体中的  $s$  个个体是  $n$  维随机向量  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  的  $s$  个样本,那么  $\{x_{ij}, i=1, 2, \dots, s\}$  就是随机变量  $X_j$  的样本,据此可估计边缘分布函数为  $F_j (j=1, 2, \dots, n)$ 。

c. 从 Copula 函数  $C$  中采样。产生  $l$  个服从联合

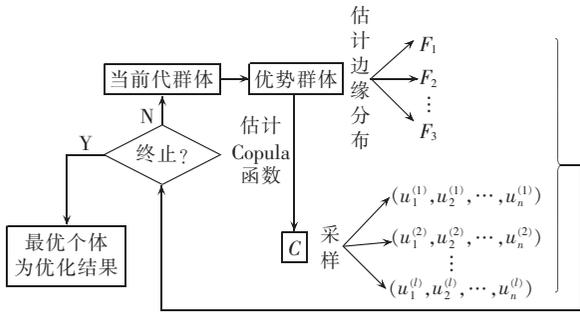


图 4 基于 Copula 理论的分布估计算法原理图  
Fig.4 Schematic diagram of estimation of distribution algorithm based on Copula theory

分布函数  $C$  的向量  $(u_1^{(k)}, u_2^{(k)}, \dots, u_n^{(k)}) (k=1, 2, \dots, l)$ 。

**d. 更新群体。**新的群体分为以下三部分:当前代群体中的适应值最好的  $m$  个个体;通过计算  $x_i^{(k)} = F_i^{-1}(u_i^{(k)}) (i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, l)$  得到  $l$  个新的个体  $(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) (k=1, 2, \dots, l)$ ;在搜索空间中按均匀分布随机产生其余的  $P_s - m - l$  个个体。

### 3 时域模型验证

为了进一步验证上述小信号模型中各个振荡模式的振荡频率,在 MATLAB/Simulink 中搭建 2 MW 基于 AC/DC/AC 变流器 PQ 解耦控制的 PMSG 的时域模型,通过输电线路连接至无穷大电网。采用电压波动、功率波动等小扰动方式激发振荡,利用 Simulink 的快速傅里叶变换(FFT)分析工具,结合表 2 给出的相关因子,在相应的相关变量上进行观测,可以发现与上述分析对应的全部机网相互作用模态,如图 5 所示,图中  $M_{\text{reg}}$  为谐波分量幅度。

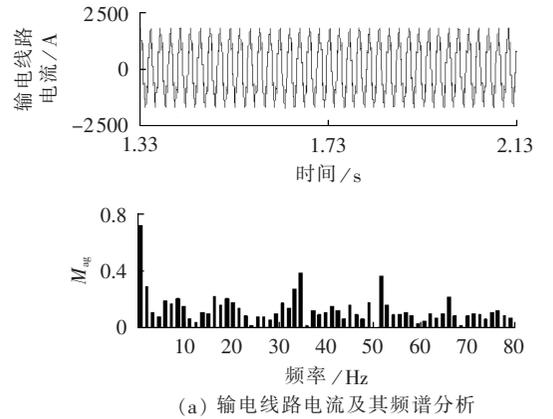
#### a. SSCI。

上述小信号模型分析表明,  $\lambda_{1,2}$  和  $\lambda_{3,4}$  对应的振荡模态与输电线路电流和串补电容的端电压有很强的相关性,同时变流器直流侧电容的电压对其影响也较大,对输电线路流过的电流进行频谱分析,得到其对应频谱特性如图 5(a)所示。输电线路流过的电流中,主要含有 70 Hz 和 38 Hz 左右的谐波成分,这与  $\lambda_{1,2}$  对应的振荡频率 71.454 0 Hz、 $\lambda_{3,4}$  对应的振荡频率 38.228 4 Hz 相吻合。

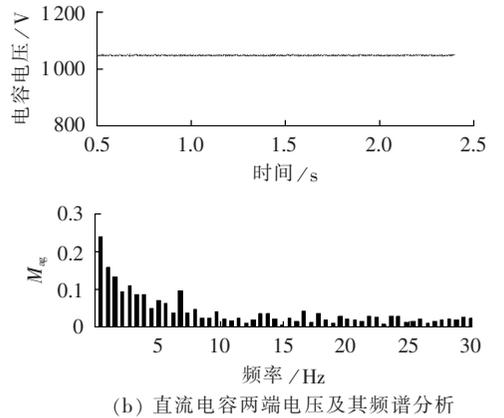
表 2 中的相关因子表明,  $\lambda_{5,6}$  对应的振荡模态由直流电容两端的电压和网侧逆变器的控制系统主导,对直流电容的电压进行频谱分析,得到其频率特性如图 5(b)所示。在直流电容的电压中除去直流分量外,主要还有 8 Hz 左右的谐波成分,这与模态  $\lambda_{5,6}$  的振荡频率 7.565 7 Hz 相吻合。

#### b. SSO。

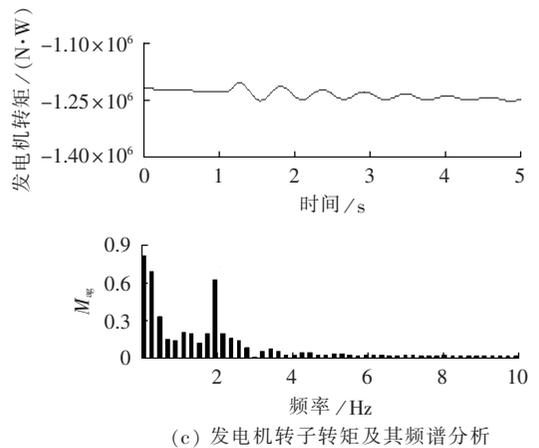
通过相关因子分析可以发现,  $\lambda_{7,8}$  所对应的振荡模态由发电机的转子主导,因此,分析发电机的转子转矩,其对应的波形和频谱特性如图 5(c)所



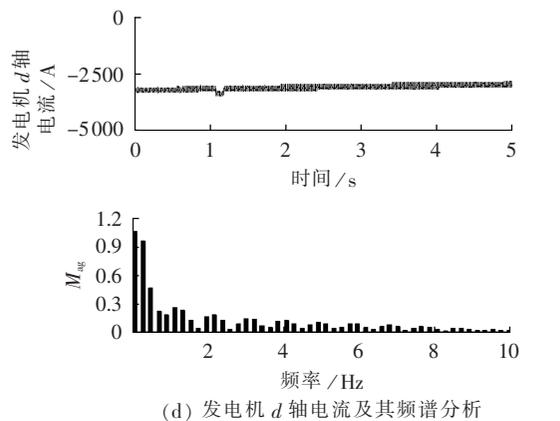
(a) 输电线路电流及其频谱分析



(b) 直流电容两端电压及其频谱分析



(c) 发电机转子转矩及其频谱分析



(d) 发电机 d 轴电流及其频谱分析

图 5 时域仿真波形及其频谱分析  
Fig.5 Waveforms and spectral analysis of time-domain simulation

示。发电机的转子转矩中除去直流分量外,主要有 1.9 Hz 左右的谐波成分,这与模态  $\lambda_{7,8}$  的振荡频率 1.8703 Hz 相吻合。

### c. 低频振荡。

通过相关因子分析可以发现,  $\lambda_{14,15}$  所对应的振荡模态由  $d$  轴磁链和机侧整流器的控制系统主导,而发电机的  $d$  轴电流决定了  $d$  轴磁链,因此,分析发电机的  $d$  轴电流,其对应的波形和频谱特性如图 5(d) 所示。发电机的  $d$  轴电流中除去直流分量外,主要还有 0.2 Hz 左右的谐波成分,这与模态  $\lambda_{14,15}$  的振荡频率 0.1349 Hz 相吻合。

## 4 变流器 PI 参数对振荡模态的影响

基于 AC/DC/AC 变流器 PQ 解耦控制的 PMSG 系统共存在 SSO、SSCI 和低频振荡 3 种振荡模态,如表 3 所示。

表 3 并网 PMSG 机组的振荡模态

Table 3 Oscillation modes of grid-connected PMSG unit

特征值	振荡模态	数值	模态频率/Hz	阻尼比
$\lambda_{1,2}$	SSCI	$-229.81 \pm j448.96$	71.4540	0.4556
$\lambda_{3,4}$	SSCI	$-128.39 \pm j240.20$	38.2284	0.4714
$\lambda_{5,6}$	SSCI	$-0.3054 \pm j47.5366$	7.5657	0.0064
$\lambda_{7,8}$	SSO	$-0.0356 \pm j11.7516$	1.8703	0.0030
$\lambda_{14,15}$	低频振荡	$-0.1885 \pm j0.8475$	0.1349	0.2171

### 4.1 单 PI 控制器参数作用分析

由于表 3 中 3 种振荡模态均与变流器控制 PI 参数紧密相关,为了研究各控制模块的 PI 参数变化对系统各个振荡模态的影响,依次改变各 PI 参数,保持其他变量不变,得到系统各种振荡模态对应的阻尼比的变化。实际中,风电场与电网之间的相互作用多表现为有功功率的振荡,故本文以与功率密切相关的 PI 参数  $K_{p4}$  为例,其他 PI 参数的研究方法与其类似。

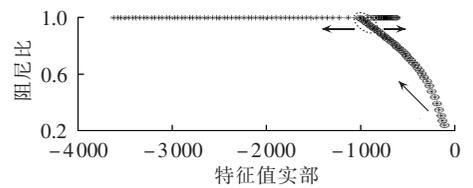
研究 PI 参数  $K_{p4}$  的变化对系统各个振荡模态的影响,保持其他变量不变,  $K_{p4}$  以 1 为步长从 1 变化到 100,得到系统各种振荡模态下所对应的特征值的实部和阻尼比的变化关系,如图 6 所示。其中,  $K_{p4}$  对 SSO 和低频振荡无影响。

考虑各个振荡模态随  $K_{p4}$  的变化特性,系统最佳  $K_{p4}$  见表 4。系统最佳  $K_{p4}$  的范围为 40~43,相应的各个振荡模态运行范围如图 6 中椭圆虚线所示。

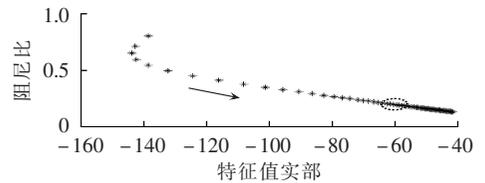
### 4.2 多 PI 控制器参数作用分析

针对多组 PI 控制器参数的不确定性问题,本节采用基于 Copula 理论的分布估计算法,寻找 PI 控制器参数的最优组合,其最佳 PI 控制器参数如表 5 所示。

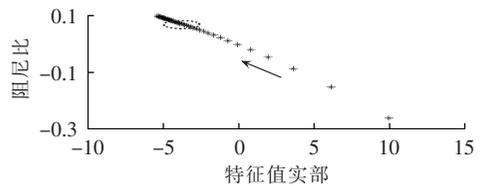
利用表 5 给出的 PI 控制器参数对 PMSG 振荡模态进行分析,各振荡模态详细信息见表 6。



(a)  $\lambda_{1,2}$  随  $K_{p4}$  的变化趋势



(b)  $\lambda_{3,4}$  随  $K_{p4}$  的变化趋势



(c)  $\lambda_{5,6}$  随  $K_{p4}$  的变化趋势

图 6 各振荡模态随  $K_{p4}$  的变化趋势

Fig.6 Variation trend of oscillation modes vs.  $K_{p4}$

表 4  $K_{p4}$  对各振荡模态阻尼比的影响

Table 4 Effect of  $K_{p4}$  on damping ratio of oscillation modes

特征值	振荡模态	最大阻尼比	最大阻尼比对应的 $K_{p4}$	最佳 $K_{p4}$	最佳 $K_{p4}$ 对应阻尼比
$\lambda_{1,2}$	SSCI	0.9966	40~43		0.9966
$\lambda_{3,4}$	SSCI	0.8009	1		0.1661
$\lambda_{5,6}$	SSCI	0.0992	100	40~43	0.0896
$\lambda_{7,8}$	SSO	0.0030	1~100		0.0030
$\lambda_{14,15}$	低频振荡	0.2171	1~100		0.2171

表 5 PMSG 机组变流器最佳 PI 控制器参数

Table 5 Optimal PI controller parameters of PMSG converter

参数	数值	参数	数值
$K_{p1}$	21.5~23(最佳 23)	$K_{i1}$	0.5~0.6(最佳 0.6)
$K_{p2}$	72~82(最佳 80)	$K_{i2}$	0.03
$K_{p3}$	0.76~0.80(最佳 0.80)	$K_{i3}$	0.4~4.0(最佳 0.4)
$K_{p4}$	40~43(最佳 43)	$K_{i4}$	1~5(最佳 1)
$K_{p5}$	0.026~0.050(最佳 0.032)	$K_{i5}$	1
$K_{p6}$	35~40(最佳 40)	$K_{i6}$	1

表 6 PMSG 机组变流器最佳 PI 控制器参数对应的各种振荡模态

Table 6 Oscillation modes of PMSG converter corresponding to optimal PI controller parameters

特征值	振荡模态	数值	模态频率/Hz	阻尼比
$\lambda_{3,4}$	SSCI	$-106.54 \pm j333.58$	53.0916	0.3042
$\lambda_{7,8}$	SSO	$-0.2112 \pm j11.94$	1.9007	0.0177

由表 6 可知,系统共出现 2 个振荡模态,与表 3 相比,  $\lambda_{1,2}$  和  $\lambda_{5,6}$  对应的 SSCI 模态,以及  $\lambda_{14,15}$  对应的低频振荡模态都消失了。这说明,通过合理的变流器控制 PI 参数调节可以起到减弱甚至消除 SSCI 以及低频振荡。另外,SSO 模态  $\lambda_{7,8}$  对应的阻尼比

由 0.003 0 增大为 0.017 7,这说明通过优化变流器控制 PI 参数可以增大 SSO 模态对应的阻尼比,起到减弱轴系振荡的目的。

## 5 结论

本文以基于 AC/DC/AC 变流器 PQ 解耦控制的 PMSG 系统为例,研究风力发电系统的振荡问题。从系统稳定性出发,尝试将直驱型风电系统的振荡问题与变流器控制联系起来,通过改变变流器控制参数抑制甚至消除系统的振荡。本文主要结论如下。

**a.** 本文对建立的 PMSG 系统模型进行了详细的分析,确定了系统所有的振荡模态。PMSG 系统存在 5 种振荡模态,其中包含 3 种 SSCI 振荡模态、1 种 SSO 模态和 1 种低频振荡模态。SSCI 振荡模态和低频振荡模态均与变流器控制密切相关,SSO 模态与机侧变流器相关。

**b.** 通过参数优化,部分 SSCI 振荡模态消失,所有的低频振荡模态也消失,同时可以增大 SSO 的阻尼比。本文所提控制器的参数优化方法在实际风电场中获得了广泛的应用,是当前风电机组网相互作用的主要解决方案。

**c.** 本文采用基于 Copula 理论的分布估计算法进行了多控制参数的寻优,优化方法可以扩大 PI 控制器参数的优化域,相比仿真试探法可以得到更加优化的控制参数的组合方式。实际结果验证了算法的可用性。

## 参考文献:

- [1] 康劲松,张焯. 多电平变流器在风力发电系统中的应用[J]. 中国电机工程学报,2009,29(24):20-25.  
KANG Jinsong,ZHANG Ye. Multi-level converter applied to wind power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009,29(24):20-25.
- [2] 王冕,陈国柱. 风电背靠背 PWM 变流器直流能量平衡新方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):28-33.  
WANG Mian,CHEN Guozhu. DC energy balance scheme for back-to-back PWM converters of wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(7):28-33.
- [3] CARLIN P W,LAXSON A S,MULJADI E B. The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology[J]. Wind Energy,2003,6(2):129-159.
- [4] ZHANG Z,ZHAO Y,QIAO W,et al. A space-vector-modulated sensorless direct-torque control for direct-drive PMSG wind turbines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2014,50(4):2331-2341.
- [5] QIAO W,YANG X,GONG X. Wind speed and rotor position sensorless control for direct-drive PMG wind turbines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2012,48(1):3-11.
- [6] LI S,HASKEW T A,SWATLOSKI R P,et al. Optimal and direct-current vector control of direct-driven PMSG wind turbines [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2012,27(5): 2325-2337.
- [7] KUMAR P. Effect of increasing rated torque of PMSG with variable wind speed on per phase output voltage for off-grid wind energy conversion system[C]//2015 Second International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering(ICACCE). Dehradun,India:IEEE,2015:49-52.
- [8] SAINZ L,MONJO L,PEDRA J,et al. Effect of wind turbine converter control on wind power plant harmonic response and resonances[J]. IET Electric Power Applications,2017,11(2):157-168.
- [9] 何世恩,董新洲. 大规模风电机组脱网原因分析及对策[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(1):131-137.  
HE Shien,DONG Xinzhou. Cause analysis on large-scale wind turbine tripping and its countermeasures[J]. Power System Protection and Control,2012,40(1):131-137.
- [10] MOHAMMED A M,IRAVANI R. Enhanced generic nonlinear and linearized models of wind power plants[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2017,32(5):3968-3980.
- [11] 谭谨,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,2013,41(17):49-55.  
TAN Jin,WANG Xiaoru,CHEN Zhe. Modal analysis of a grid-connected direct-drive permanent magnet synchronous generator wind turbine system[J]. Power System Protection and Control, 2013,41(17):49-55.
- [12] HSU P,MULJADI E. Damping control for permanent magnet synchronous generators and its application in a multi-turbine system[C]//2014 Australasian Universities Power Engineering Conference(AUPEC). Perth,WA,Australia:IEEE,2014:1-6.
- [13] 高本锋,刘晋,李忍,等. 风电机组的次同步控制相互作用研究综述[J]. 电工技术学报,2015,30(16):154-161.  
GAO Benfeng,LIU Jin,LI Ren,et al. Studies of sub-synchronous control interaction in wind turbine generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(16): 154-161.
- [14] SURIYAARACHCHI D H R,ANNAKAGE U D,KARAWITA C,et al. A procedure to study sub-synchronous interactions in wind integrated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(1):377-384.
- [15] ANONYMOUS. Terms,definitions and symbols for subsynchronous oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems,2007,PAS-104(6):1326-1334.
- [16] 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.  
XIE Xiaorong,LIU Huakun,HE Jingbo,et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(9):2366-2372.
- [17] 薛禹胜,郝思鹏,刘俊勇,等. 关于低频振荡分析方法的评述[J]. 电力系统自动化,2009,33(3):1-8.  
XUE Yusheng,HAO Sipeng,LIU Junyong,et al. A review of analysis methods for low-frequency oscillations[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(3):1-8.
- [18] 彭章刚,周步祥,冯超. 基于 PMSG-PSS 的高风电渗透率电网低频振荡分析[J]. 高压电器,2016(6):147-152.  
PENG Zhanggang,ZHOU Buxiang,FENG Chao. Analysis of low frequency oscillation for power system with large wind power integration based on PMSG-PSS[J]. High Voltage Apparatus,

2016(6):147-152.

- [19] SUN L,GONG C, HAN F. Design and optimization of control parameters based on direct-drive permanent magnet synchronous generator for wind power system[C]//2013 8th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications(ICIEA). Melbourne, VIC, Australia:IEEE,2013:1238-1243.

#### 作者简介:

吴汪平(1991—),男,安徽安庆人,硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化(E-mail:wode15sjtu@sjtu.edu.cn);  
楚皓翔(1990—),男,河南商丘人,硕士研究生,研究方



吴汪平

向为电力系统及其自动化;

解大(1969—),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,博士,研究方向为电力系统分析、灵活交流输电设备、新能源;

张延迟(1967—),男,北京人,副教授,博士,研究方向为并网型风力发电机和电力系统仿真;

王西田(1973—),男,陕西旬阳人,副教授,博士,研究方向为电机机网相互作用;

李国杰(1965—),男,浙江瑞安人,教授,博士,主要研究方向为新能源控制与接入、微电网分析与控制。

## Influence of PI controllers' parameters on machine-network interaction of grid-connected PMSG system

WU Wangping<sup>1</sup>,CHU Haoxiang<sup>1</sup>,XIE Da<sup>1</sup>,ZHANG Yanchi<sup>2</sup>,WANG Xitian<sup>1</sup>,LI Guojie<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering,School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China;2. School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University,Shanghai 200240,China)

**Abstract:** A small-signal model of PMSG(Permanent Magnet Synchronous wind Generator) based on PQ decoupling control is built to study the oscillation of grid-connected PMSG system. The oscillation modes of the system,the characteristic frequency and the dominant state variables of each oscillation mode are found out by eigenvalue analysis method and correlation factor analysis method,and the optimal parameter combination of PI controller is found by estimation of distribution algorithm based on Copula theory. The time-domain simulation is carried out on the MATLAB/Simulink platform to verify the existence of various oscillation modes. Without changing the stability of the system,the sub-synchronous control interaction mode,sub-synchronous oscillation mode and low frequency oscillation mode of the system are studied by changing the converter control parameters in turn. The modes of the established PMSG model are analyzed with the optimal PI controllers' parameters,which verifies the correctness of the proposed model.

**Key words:** PMSG; control parameters; sub-synchronous control interaction; sub-synchronous oscillation; low frequency oscillation; estimation of distribution algorithm

(上接第14页 continued from page 14)

## Typical power curve mining of energy storage system combined with sequence distribution probability

YANG Xiyun<sup>1</sup>,REN Jie<sup>1</sup>,LI Xiangjun<sup>2</sup>,DONG Dehua<sup>1</sup>,JIA Xuecui<sup>2</sup>

(1. School of Control and Computer Engineering,North China Electric Power University,Beijing 102206,China;  
2. State Key Laboratory of Control and Operation of Renewable Energy and Storage Systems, China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

**Abstract:** A typical power curve mining method for energy storage system is proposed in the application of smoothing power fluctuation of photovoltaic power plant. According to the power interval distribution characteristics of energy storage system in longitudinal timing sequence,the distribution intervals with the distribution probability larger than the threshold and their corresponding characteristic power values are searched by the quantum genetic algorithm based on Bloch sphere. The typical power value at the moment is obtained according to the characteristic power value,and then the typical power curve is determined. The typical power curves of the energy storage system under four weather patterns are obtained from mining are comprehensively analyzed,which verifies the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** energy storage; power smoothing; typical power curve; distribution probability interval