

风电并网系统小干扰概率稳定性分析与改善

边晓燕¹, 耿艳¹, 李学武¹, 符杨¹, 王倩²

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海绿色环保能源有限公司, 上海 200433)

摘要: 在桨距角控制系统中加装电力系统稳定器(PSS)以阻尼电力系统低频振荡, 并且考虑系统运行方式的随机不确定性, 利用累积概率曲线来获得随机变量的概率数字特征。采用基于数值分析的概率方法研究含风电场系统的小干扰稳定统计属性。通过在含风电场的五机两区域系统中进行仿真, 验证在桨距角控制系统中安装PSS对改善小干扰概率稳定性的有效性, 并对其改善效果进行评估。仿真结果表明, 在桨距角控制系统中加装PSS能有效抑制本地振荡模式, 并削弱区间振荡。

关键词: 桨距角控制; 电力系统稳定器; 低频振荡; 累积概率; 小干扰稳定

Probabilistic small-signal stability analysis and improvement of power system with wind farm integration

BIAN Xiaoyan¹, GENG Yan¹, LI Xuewu¹, FU Yang¹, WANG Qian²

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Green Energy Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

Abstract: A power system stabilizer (PSS) is installed in pitch control system to damp low frequency oscillation of power system, taking into consideration of the stochastic uncertainty of system operating conditions. Cumulative probability curves are employed to obtain probability numerical characteristics of stochastic variables. The probabilistic method based on numerical analysis is used to study small-signal stability statistical attributes of power system with wind farm integration. Through simulation on a five-machine two-area system with wind farm integration, the effectiveness that a PSS is installed in pitch control system to improve probabilistic small-signal stability is verified, and the improvement of PSS is evaluated. Simulation results demonstrate that the installation of PSS in pitch control system could suppress effectively local oscillation and weaken inter-area oscillation.

Key words: pitch control; power system stabilizer (PSS); low-frequency oscillation; cumulative probability; small-signal stability

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)20-0001-07

0 引言

近年来, 全国风电装机及联网情况增长较快, 给电力系统的小干扰稳定性带来了较大影响^[1-2]。由于风电机组出力的随机性程度高与波动性大等特点, 电力系统处于不断变化的运行方式下^[3-7]。应用传统的确定性方法可以分析单一运行方式, 但不能对小干扰稳定性进行全面的描述, 因此, 采用概率法分析小干扰稳定更加符合实际, 可完整理解其机

理和影响因素, 为控制决策提供指导^[8-10]。

目前针对风电并网系统小干扰概率稳定性已有一些研究。文献[9-10]采用 Gram-Charlier 级数和特征值灵敏度, 文献[11]基于随机动态模型, 文献[12]采用 $2m+1$ 点估计法和 Cornish Fisher 展开以及正交变换, 文献[13]利用多点线性化技术。上述文献[9-13]分别采用不同的方法, 分析小干扰概率稳定性, 在只考虑一种随机变量的前提下, 表明风电并网会引起小干扰概率失稳, 但并没有明确提出改善方案。对此, 文献[14]考虑电力系统的多种随机不确定性, 采用概率方法研究由双馈风力发电机 (Double Fed Induction Generator, DFIG) 组成的风电场接入电力系统后对小干扰稳定性的影响, 并在同

基金项目: 上海市科委科技创新项目 (14DZ1200905); 上海市教委科研创新项目 (12ZZ172); 上海绿色能源并网工程技术研究中心 (13DZ2251900)

步发电机组中加装 PSS 抑制低频振荡。然而文献[14]并没有考虑在风电机组中加装 PSS 来改善小干扰概率稳定性。

大量研究表明在 DFIG 风电机组转子侧变频器控制器加装 PSS 有助于改善小干扰稳定性^[15-16]，但在桨距角控制系统中加装 PSS 的研究很少。文献[17]考虑三种运行方式，表明在桨距角控制系统中加装 PSS 能够抑制低频振荡。然而由于电力系统处于不断变化的多运行方式下，因此该研究不具有应用上的普遍性。

鉴于此，本文采用插入式建模技术^[18]构建整个系统的状态矩阵，利用概率法考虑系统的多种随机变量，包括风电机组和普通发电机组出力、负荷以及节点电压，分析小干扰概率稳定性。在桨距角控制系统中加装 PSS 来提高系统阻尼，从而抑制低频振荡。通过在含风电场的两区域系统中进行仿真，表明在桨距角控制系统中的 PSS 可以明显抑制本地振荡并且削弱区间振荡，表明了所提方法的正确性与有效性。

1 在桨距角控制系统中加装 PSS 抑制低频振荡的机理

桨距角控制模型如图 1 所示。图中， T_{ser} 和 K_{p4} 分别为风力机速度调节器的时间常数和比例增益。

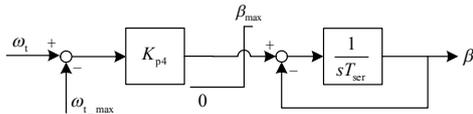


图 1 桨距角控制框图

Fig. 1 Control diagram of pitch control strategy

假设风电场出力和风速的关系是线性关系，采用分段函数表示为

$$P = \begin{cases} 0 & v < v_{in} \text{ 或 } v > v_{out} \\ \frac{v - v_{in}}{v_r - v_{in}} P_r & v_{in} < v < v_r \\ P_r & v_r < v < v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

式中： v_{in} 为切入风速； v_{out} 为切出风速； v_r 为额定风速。在切入风速以上切出风速以下运行时，风力机运行于最大风功率追踪模式下，桨距角 $\beta = 0$ 。

在桨距角控制系统中加装 PSS，如图 2 所示，其输入信号为 DFIG 的转差，该状态量可反应系统振荡。图中， G_x 为桨距角控制系统的传递函数， G_{PSS} 为 PSS 的传递函数。采用的 PSS 模型如图 3 所示。图中， K_{PSS} 为 PSS 的增益； T_1 和 T_2 为相位补偿

时间常数； T_w 为隔直时间常数，用于消除稳态偏差量。

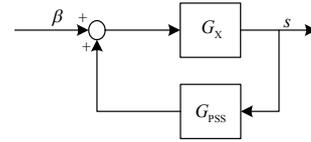


图 2 PSS 安装位置

Fig. 2 Installation location of PSS

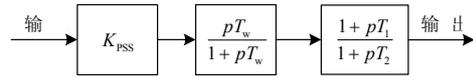


图 3 PSS 模型

Fig. 3 Module of PSS

风力机能从风中汲取的机械转矩为^[19]

$$T_t = \frac{\rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta)}{2 \omega_t} \quad (2)$$

式中： ρ 为空气密度； R 为风轮叶片半径； v 为风速； ω_t 为风轮转动角速度； C_p 为功率系数，它是叶尖速比 λ 和 β 的函数，即^[20]

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{1}{2} \left(\frac{RC_f}{\lambda} - 0.022\beta - 2 \right) e^{-0.255 \frac{RC_f}{\lambda}} \quad (3)$$

式中： $\lambda = \omega_t R / v$ ； C_f 为叶片设计常数(对现代大型风电机组的三叶片风力机为 3)。控制风轮角速度，可改变 λ ，使 C_p 值达到最大，从而实现对风能的最大功率跟踪。当风力机的转速超过最高值时，桨距角控制器动作，以降低 C_p 值，从而降低风力机的机械转矩。此外，通过 PSS 的输入信号并调节其相位补偿时间常数和增益，可以使风电机组发出与系统振荡相关的电磁功率，使系统产生正阻尼，进而抑制或者削弱低频振荡。

2 多运行方式下电力系统特征值概率分布

2.1 系统的随机变量

当考虑系统的多运行方式时，负荷、风电机组以及同步发电机组出力可以被当作服从任意分布的随机变量。

根据李雅普诺夫第一法，电力系统在遭受小扰动后的稳定性可由状态矩阵的特征值得到，特征值由运行状态决定。当运行状态随发电机出力和负荷的变化而变化时，特征值也变化。

2.2 随机变量的累积概率

利用累积概率曲线(如图 4、图 5 和图 6 所示)求得随机变量的期望、方差等概率数字特征，并进行概率潮流计算和概率特征值计算。

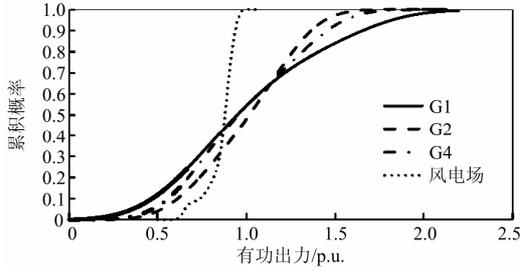


图 4 同步发电机与风电场出力的累积概率

Fig. 4 Cumulative probability of output of synchronous generators and wind farm

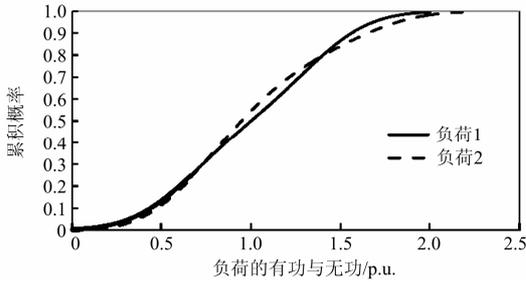


图 5 负荷的累积概率

Fig. 5 Cumulative probability of load 1 and load 2

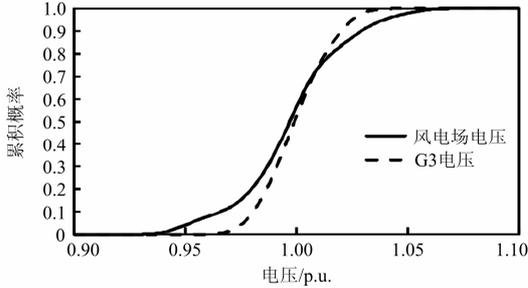


图 6 风电场与 G3 电压的累积概率

Fig. 6 Cumulative probability of voltages of wind farm and G3

2.3 概率潮流计算

进行概率潮流计算时, 节点电压和节点注入功率都是随机变量。在一个含有 N 节点的电力系统中, 节点注入功率可以表示为节点电压的二次函数。

$$\mathbf{Y} = f(\mathbf{U}) = g(U_1 U_2, \dots, U_i U_j, \dots, U_{2N} U_{2N}) \quad (4)$$

式中: \mathbf{U} 为节点复电压向量, 在一个 N 节点的电力系统中, $\mathbf{U} = [U_1, U_2, \dots, U_{2N}]^T$; \mathbf{Y} 为节点注入功率向量。对式(4)在节点电压期望 $\bar{\mathbf{U}}$ 附近进行泰勒级数展开, 得到

$$\mathbf{Y} = f(\bar{\mathbf{U}}) + \mathbf{J}_{\bar{\mathbf{U}}} \Delta \mathbf{U} + f(\Delta \mathbf{U}) \quad (5)$$

式中

$$\Delta \mathbf{U} = \mathbf{U} - \bar{\mathbf{U}} = \mathbf{J}_{\bar{\mathbf{U}}}^{-1} \Delta \mathbf{Y} = \mathbf{J}_{\bar{\mathbf{U}}}^{-1} (\mathbf{Y} - \bar{\mathbf{Y}}) \quad (6)$$

$$\mathbf{J}_{\bar{\mathbf{U}}} = \left. \frac{\partial f(\mathbf{U})}{\partial \mathbf{U}} \right|_{\mathbf{U}=\bar{\mathbf{U}}} \quad (7)$$

式中, $\bar{(\cdot)}$ 为期望算子。

令 $\mathbf{Y} = \bar{\mathbf{Y}} + \Delta \mathbf{Y}$, 并对式(5)求期望有

$$\bar{\mathbf{Y}} = f(\bar{\mathbf{U}}) + \overline{f(\Delta \mathbf{U})} \quad (8)$$

式中, $\overline{f(\Delta \mathbf{U})} = g(C_{U_1, U_1}, \dots, C_{U_i, U_j}, \dots, C_{U_{2N}, U_{2N}})$, 其中, 节点 i 电压与节点 j 电压之间的协方差 C_{U_i, U_j} 可通过式(9)求得。

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_U = \overline{\Delta \mathbf{U} \Delta \mathbf{U}^T} = \mathbf{J}_{\bar{\mathbf{U}}}^{-1} \mathbf{C}_Y (\mathbf{J}_{\bar{\mathbf{U}}}^{-1})^T = \mathbf{J}_{\bar{\mathbf{U}}}^{-1} \{ \mathbf{C}_Y - \\ \overline{\mathbf{J}_{\bar{\mathbf{U}}} \Delta \mathbf{U} f^T(\Delta \mathbf{U}) + f(\Delta \mathbf{U}) \Delta \mathbf{U}^T \mathbf{J}_{\bar{\mathbf{U}}}^T + f(\Delta \mathbf{U}) f^T(\Delta \mathbf{U}) + \\ f(\Delta \mathbf{U}) f^T(\Delta \mathbf{U}) \} (\mathbf{J}_{\bar{\mathbf{U}}}^{-1})^T \end{aligned} \quad (9)$$

式中: \mathbf{C}_Y 为节点注入功率的协方差矩阵; \mathbf{C}_U 为节点电压的协方差矩阵。

迭代求解式(8)可得到电力系统运行状态的期望值。

2.4 概率特征值计算

电力系统某一特征值可以表示为节点电压向量的非线性函数:

$$\lambda_k = g_k(\mathbf{U}) \quad (10)$$

对式(10)求期望可得到该特征值的期望:

$$\bar{\lambda}_k = g_k(\bar{\mathbf{U}}) \quad (11)$$

由于直接求出 $g_k(\mathbf{U})$ 的表达式是极其复杂的, 因此采用如下方法求特征值的期望。

对式(10)在节点电压期望附近做泰勒级数展开, 保留 2 阶项的近似表达式为

$$\lambda_k = g_k(\bar{\mathbf{U}}) + \sum_{i=1}^{2N} \left(\frac{\partial g_k}{\partial U_i} \right) \Big|_{\mathbf{U}=\bar{\mathbf{U}}} \Delta U_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{2N} \sum_{j=1}^{2N} \frac{\partial^2 g_k}{\partial U_i \partial U_j} \Big|_{\mathbf{U}=\bar{\mathbf{U}}} \Delta U_i \Delta U_j \quad (12)$$

由式(12), 忽略非线性项有

$$\lambda_k = g_k(\bar{\mathbf{U}}) + \sum_{i=1}^{2N} \left(\frac{\partial g_k}{\partial U_i} \right) \Big|_{\mathbf{U}=\bar{\mathbf{U}}} \Delta U_i = g_k(\bar{\mathbf{U}}) + \sum_{i=1}^{2N} (\mathbf{J}_{\lambda_{k,i}} \Delta U_i) \quad (13)$$

式中, $\mathbf{J}_{\lambda_{k,i}}$ 的表达式可通过式(14)求得^[21]。

$$\mathbf{J}_{\lambda_{k,i}} = \frac{\mathbf{l}_k^T \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial U_i} \mathbf{r}_k}{\mathbf{l}_k^T \mathbf{r}_k} \quad (14)$$

式中: \mathbf{l}_k 和 \mathbf{r}_k 分别表示特征值 λ_k 的左右特征向量; U_i 为节点 i 电压的实部或者虚部。A 对 U_i 的偏导可以

使用 PMT 建模技术求得^[22]。将由等式(14)求得各元素的值代入式(13)计算 $g_k(\bar{U})$ 的表达式, 即特征值 λ_k 的期望。

2.5 特征值概率分布

根据半不变量的性质^[23], 可以得到特征值 λ_k 的 j 阶半不变量:

$$\gamma_j(\lambda_k) = \sum_{i=1}^{2N} J_{k,i}^j \gamma_k(Y_i), \quad j=4,5 \quad (15)$$

式中, $\gamma_j(\lambda_k)$ 和 $\gamma_k(Y_i)$ 分别为特征值 λ_k 和注入功率 Y_i 的 j 阶和 k 阶半不变量。

然后应用 Gram-Charlier 级数^[24] 就可得到特征值 λ_k 的概率密度和累积分布函数, 其表达式分别如式(16)和式(17)所示。

$$f(\lambda_k) = N(x) \left[1 + \frac{\gamma_3(\lambda_k)}{6\sigma^3} (x^3 - 3x) + \frac{\gamma_4(\lambda_k)}{24\sigma^4} (x^4 - 6x^2 + 3) + \frac{\gamma_5(\lambda_k)}{120\sigma^5} (x^5 - 10x^3 + 15x) \right] \quad (16)$$

$$P\{\lambda_k < x_c\} = \int_{-\infty}^{x_c} N(x) dx - N(x_c) \left[\frac{\gamma_3(\lambda_k)}{6\sigma^3} (x_c^2 - 1) + \frac{\gamma_4(\lambda_k)}{24\sigma^4} (x_c^3 - 3x_c) + \frac{\gamma_5(\lambda_k)}{120\sigma^5} (x_c^4 - 6x_c^2 + 3) \right] \quad (17)$$

式中: $f(\lambda_k)$ 为特征值 λ_k 的概率密度函数; $N(x)$ 为标准正态分布的概率密度函数; $\gamma_3(\lambda_k)$ 为特征值 λ_k 的 3 阶半不变量, 其求解过程见参考文献[23]; $x = \lambda_k - \bar{\lambda}_k / \sigma$, 其中 σ 为特征值的标准方差, 可由式(18)求得。

$$C_{\lambda_m, \lambda_n} = \overline{(\lambda_m - \bar{\lambda}_m)(\lambda_n - \bar{\lambda}_n)} = \sum_{i=1}^{2N} \sum_{j=1}^{2N} J_{\lambda_m, i} J_{\lambda_n, j} C_{U_i, U_j} \quad (18)$$

3 算例系统及分析

3.1 算例系统

图 7 所示的算例系统在典型的四机两区域系统^[25] 上修改而来。图中, 风电场由 80 台 1.5 MW 的 DFIG 组成, 节点 15 为平衡节点。所有同步发电机采用完整的 6 阶模型, 网络与同步发电机数据见参考文献[25], 系统和 DFIG 模型与参数的细节见参考文献[26], 采用如图 4、图 5 和图 6 所示的累积概率曲线, PSS 模型如图 3 所示。

3.2 算例分析

通过以下算例验证在桨距角控制系统中加装 PSS 对改善小干扰概率稳定性的贡献。

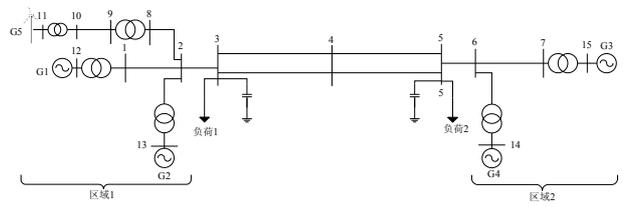


图 7 含风电场的五机两区域系统

Fig. 7 A two-area system with wind farm integration

3.2.1 算例 1

未加装 PSS, 原系统有三个机电振荡模式, 如表 1 所示。由表 1 可以看出, 模式 3 实部期望为正, 因此系统是不稳定的。各振荡模式的参与因子如表 2 所示。由表 1 和表 2 知: 模式 1 和模式 2 为本地振荡模式, 模式 3 属于区间振荡模式。各振荡模式示意分别如图 8 和图 9 所示。

表 1 原系统机电振荡特征值概率

Table 1 Probability of electromechanical oscillation modes of the original system

模式	特征值 $\bar{\sigma} \pm j\bar{\omega}$	阻尼 比 $\bar{\xi}$	$P\{\sigma < 0\} / \%$	$P\{\xi > 0.1\} / \%$
1	$-0.9154 \pm j4.4301$	0.202 4	63.64	56.68
2	$-1.0333 \pm j5.8956$	0.172 6	66.92	57.29
3	$0.4608 \pm j3.1154$	-0.146 3	0.00	0.00

表 2 参与因子

Table 2 Participation factors of oscillation modes

模式	G1	G2	G3	G4	G5
1	$0.99 \angle -39^\circ$	$0.83 \angle 105^\circ$	—	—	—
2	—	—	$0.39 \angle -4^\circ$	$0.20 \angle -7^\circ$	—
3	$0.24 \angle 85^\circ$	$0.51 \angle -25^\circ$	$0.01 \angle -14^\circ$	$0.02 \angle -11^\circ$	—

3.2.2 算例 2

在桨距角控制系统中加装 PSS, 参数为: $K=1.0$, $T_w=10$ s, $T_1=0.1$ s, $T_2=0.05$ s。系统机电振荡特征值概率如表 3 所示。可以看出, 在桨距角控制器中加入 PSS 后, 本地振荡模式 1 和模式 2 阻尼比大于 0.1 的概率均为 100%, 区间振荡模式 3 实部期望也由正值变为负值。图 10 和图 11 分别为模式 1 和模式 2 的实部概率密度曲线, 图 12 为 3 个振荡模式在加装 PSS 前后的概率特征值变化。由图 10 和图 11 可以看出, PSS 的加入使原来相对分散的分布变得集中, 即特征值将在小范围内变化。从图 12 可以看出, PSS 的加入使概率特征值向复平面的左半平面移动, 说明在桨距角控制系统中加装 PSS 可以改善小干扰概率稳定性。

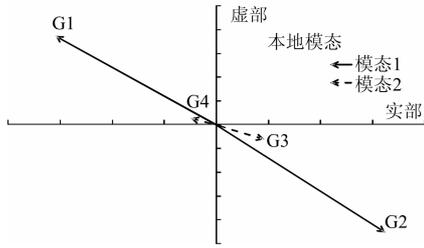


图 8 本地振荡模态示意

Fig. 8 Mode shapes of local oscillation modes

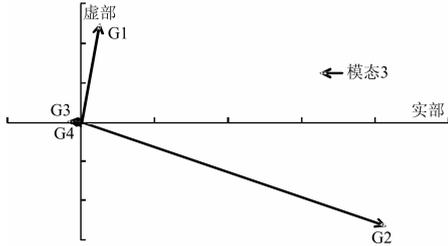


图 9 区间振荡模态示意

Fig. 9 Mode shapes of inter-area oscillation modes

表 3 加入 PSS 后系统机电振荡特征值概率

Table 3 Probability of electromechanical oscillation modes of the system with PSS added

模态	特征值 $\bar{\sigma} \pm j\bar{\omega}$	阻尼比 $\bar{\xi}$	$P\{\sigma < 0\} / \%$	$P\{\xi > 0.1\} / \%$
1	$-1.6002 \pm j4.2235$	0.354 3	86.57	100.00
2	$-1.0325 \pm j5.8902$	0.172 7	100.00	100.00
3	$-0.1548 \pm j3.0817$	0.050 2	57.59	55.75

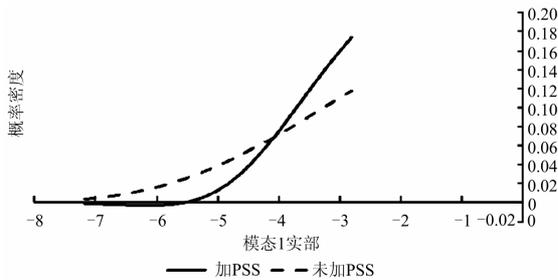


图 10 模式 1 实部概率密度曲线

Fig. 10 Probability density function of real parts of mode 1

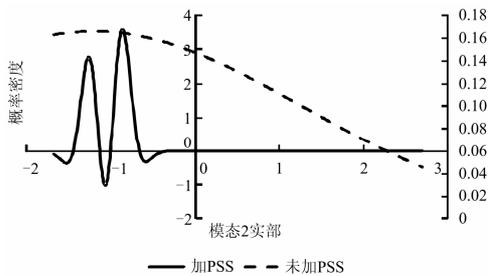


图 11 模式 2 实部概率密度曲线

Fig. 11 Probability density function of real parts of mode 2

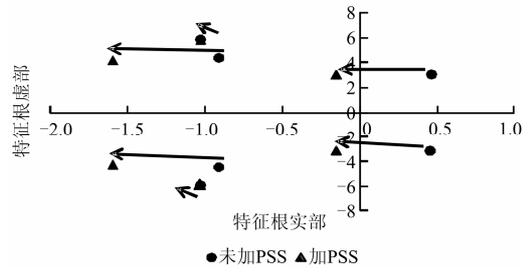


图 12 加装 PSS 前后系统概率特征值对比

Fig. 12 Probabilistic eigenvalues comparison between the original system and the system with PSS added

3.2.3 PSS 增益对概率特征值的影响

在 PSS 增益 K 值为 1.0 的基础上, 调整增益 K 值分别为 0.9 和 1.1, 得到系统机电振荡特征值概率分别如表 4 和表 5 所示。比较表 3、表 4 和表 5 可知, 当 K 值减小 0.1 幅度时, 模式 1 和模式 3 阻尼比期望、实部小于 0 的概率以及阻尼比大于 0.1 的概率均下降; 当 K 值增大 0.1 幅度时, 模式 1 和模式 3 实部小于 0 的概率以及阻尼比大于 0.1 的概率均升高。而模式 2 在这两种情形下除概率特征值实部期望有轻微变化外, 其余概率数字特征没有变化, 表明模式 2 对 PSS 增益变化的灵敏度较低。

表 4 PSS 增益为 0.9 时的机电振荡特征值概率

Table 4 Probability of electromechanical oscillation eigenvalues when PSS gain is 0.9

模式	特征值 $\bar{\sigma} \pm j\bar{\omega}$	阻尼比 $\bar{\xi}$	$P\{\sigma < 0\} / \%$	$P\{\xi > 0.1\} / \%$
1	$-1.3224 \pm j4.1536$	0.303 4	63.59	58.50
2	$-1.0328 \pm j5.8899$	0.172 7	100.00	100.00
3	$-0.0830 \pm j3.1102$	0.026 7	55.73	53.60

表 5 PSS 增益为 1.1 时的机电振荡特征值概率

Table 5 Probability of electromechanical oscillation eigenvalues when PSS gain is 1.1

模式	特征值 $\bar{\sigma} \pm j\bar{\omega}$	阻尼比 $\bar{\xi}$	$P\{\sigma < 0\} / \%$	$P\{\xi > 0.1\} / \%$
1	$-1.6040 \pm j4.1832$	0.358 0	86.62	100.00
2	$-1.0323 \pm j5.8901$	0.172 6	100.00	100.00
3	$0.1862 \pm j3.0862$	0.060 2	58.32	57.16

4 结论

采用概率方法研究风电并网系统的小干扰稳定性, 考虑系统的多种随机变量, 包括同步发电机与风力机出力的随机性, 节点电压以及负荷的波动, 并在桨距角控制系统中加装 PSS 抑制电力系统低频

振荡, 通过在含风电场的两区域系统中进行仿真表明: 在桨距角控制系统中加装 PSS 能够改善小干扰概率稳定性, 对本地振荡和区间振荡均有显著的阻尼效果。

参考文献

- [1] 舒进, 都劲松, 王靖程, 等. 基于奇异摄动降阶的风电接入系统阻尼分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 18-25.
SHU Jin, DU Jinsong, WANG Jingcheng, et al. System damping analysis after wind power integration using singular perturbation system reduction[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 18-25.
- [2] 谭谨, 王晓茹, 李龙源. 含大规模风电的电力系统小扰动稳定研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 15-23.
TAN Jin, WANG Xiaoru, LI Longyuan. A survey on small signal stability analysis of power systems with wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 15-23.
- [3] 张宁宇, 高山, 赵欣. 一种考虑风电随机性的机组组合模型及其算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 22-29.
ZHANG Ningyu, GAO Shan, ZHAO Xin. An unit commitment model and algorithm with randomness of wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 22-29.
- [4] YU H, CHUNG C Y, WONG K P, et al. A change constrained transmission network expansion planning method with consideration of load and wind farm uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1568-1576.
- [5] 徐立中, 易永辉, 朱承治, 等. 考虑风电随机性的微网多时间尺度能量优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 1-8.
XU Lizhong, YI Yonghui, ZHU Chengzhi, et al. Multi-time scale optimal energy dispatch of microgrid considering stochastic wind power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 1-8.
- [6] 谈天夫, 高山, 李海峰, 等. 基于等效间隔-频率分布的含风电场电力系统随机生产模拟[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 148-157.
TAN Tianfu, GAO Shan, LI Haifeng, et al. Power system probabilistic production simulation based on equivalent interval frequency distribution including wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 148-157.
- [7] 杨楠, 王波, 刘涤尘, 等. 考虑柔性负荷调峰的大规模风电随机优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 231-238.
YANG Nan, WANG Bo, LIU Dichen, et al. Large-scale wind power stochastic optimization scheduling method considering flexible load peaking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 231-238.
- [8] 边晓燕, 周歧斌, 王克文, 等. 基于概率法的静止无功补偿器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 18-22.
BIAN Xiaoyan, ZHOU Qibin, WANG Kewen, et al. Robust SVC controller designed by probabilistic method[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 18-22.
- [9] 杜文娟, 卜思齐, 王海风. 考虑并网风电随机波动的电力系统小干扰概率稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(增刊 1): 7-11.
DU Wenjuan, BU Siqi, WANG Haifeng. Effect of stochastic variation of grid-connected wind generation on power system small-signal probabilistic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(S1): 7-11.
- [10] BU S Q, DU W, WANG H F, et al. Probabilistic analysis of small-signal stability of large-scale power system as affected by penetration of wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 762-770.
- [11] 周明, 元博, 张小平, 等. 基于SDE的含风电电力系统随机小干扰稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1575-1582.
ZHOU Ming, YUAN Bo, ZHANG Xiaoping, et al. Stochastic small signal stability analysis of wind power integrated power systems based on stochastic differential equations[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1575-1582.
- [12] YUE H, LI G Y, ZHOU M. A probabilistic approach to small signal stability analysis of power systems with correlated wind sources[J]. Electrical Engineering & Technology, 2013, 8(6): 1605-1614.
- [13] BU S Q, DU W, WANG H F. Probabilistic analysis of small-signal rotor angle/voltage stability of large-scale AC/DC power systems as affected by grid-connected offshore wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3712-3719.

- [14] 边晓燕, 李广跃, 王克文, 等. 多运行方式下含风电场电力系统的小干扰概率稳定性研究[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3046-3054.
BIAN Xiaoyan, LI Guangyue, WANG Kewen, et al. Probabilistic small signal stability analysis of power system integrated with large-scale wind farm considering multi operating conditions[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3046-3054.
- [15] HUANG H Z, CHUNG C Y. Coordinated damping control design for DFIG-based wind generation considering power output variation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1916-1625.
- [16] 张子泳, 胡志坚, 李勇汇, 等. 大型双馈风力发电系统小信号动态建模及附加阻尼控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 127-133.
ZHANG Ziyong, HU Zhijian, LI Yonghui, et al. Small signal dynamic modelling and additional damping controller designing for large wind generation system based on DFIG[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 127-133.
- [17] 田中伟, 吴政球, 龚志敏. 并网型异步风力发电机电力系统稳定器控制与仿真[J]. 电机与控制应用, 2013, 40(8): 52-56.
TIAN Zhongwei, WU Zhengqiu, GONG Zhimin. Power system stabilizer control and simulation of asynchronous wind generator connected into power grid[J]. Electric Machine & Control Application, 2013, 40(8): 52-56.
- [18] TSE C T, CHUNG C Y. An electric power network modeling method: US, US6[P]. 2001-3.
- [19] AKHMATOV V. 风力发电用感应发电机[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [20] WU F, ZHANG X P, GODFREY K, et al. Small signal stability analysis and optimal control of a wind turbine with doubly fed induction generator[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2007, 1(5): 751-760.
- [21] 马林, 廖培金, 彭书涛. 小干扰稳定中特征值对运行参数的灵敏度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(4): 31-35.
MA Lin, LIAO Peijin, PENG Shutao. Eigenvalue sensitivity with respect to operating parameters in small signal stability analysis[J]. Proceedings of CSU-EPSCA, 2005, 17(4): 31-35.
- [22] BIAN X Y. Probabilistic robust damping controller designs for FACTS devices and PSS[D]. The Hong Kong Polytechnic University, 2006.
- [23] KENDALL M G, STUART A. The advanced theory of statistics[M]. C Griffin, 1961.
- [24] WANG X F, MCDONALD J. Modern power system planning[M]. McGraw-Hill, 1994: 465.
- [25] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. McGraw-Hill Company, 1994.
- [26] BIAN X Y, HUANG X X, WONG K C, et al. Improvement on probabilistic small-signal stability of power system with large-scale wind farm integration[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 61: 482-488.

收稿日期: 2015-01-03; 修回日期: 2015-01-23

作者简介:

边晓燕(1976-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定与控制, 风力发电; E-mail: kuliz@163.com

耿艳(1989-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为多运行方式下风电并网系统小干扰稳定性分析与改善; E-mail: gfx19891025@163.com

李学武(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为海上风电机组运行维护策略优化。E-mail: lxw890820@163.com

(编辑 魏小丽)