

6-1-2020

Design and Simulation Study of Neural Adaptive Power System Stabilizer of DFIG

Yuguang Niu

1. State Key Laboratory for Alternate Electric Power System with Renewable Energy Source, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; ;

Yang Wei

2. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; ;3. North China Power Engineering CO. LTD., China Power Consulting Group, Beijing 100120, China;

Xiaoming Li

2. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; ;

Shilin Wang

2. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; ;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Design and Simulation Study of Neural Adaptive Power System Stabilizer of DFIG

Abstract

Abstract: *A Flux Magnitude Angle Control (FMAC) strategy based Neural Adaptive Power System Stabilizer (NPSS) was designed to improve the transient stability of grid-connected Double Fed Induction Generators (DFIGs). An online training algorithm based Elman artificial neural network was adopted to achieve adaptive control. For releasing computing burden and improving computing speed, a simplified method was used, where the calculation of jacobian matrix was replaced by the sign of itself. A simplified and generic renewable power system demonstrates the control performance contributions. The results of both dominant eigenvalue analysis and time response simulation illustrate contributions to system damping that the NPSS can make. Performance capabilities superior to those provided by Synchronous Generation (SG) with Automatic Voltage Regulator (AVR) and PSS control demonstrate that NPSS installed DFIG has better performances of system damping, voltage regulation and transient stability.*

Keywords

double fed induction generator, power system stabilizer, artificial neural network, system damping

Authors

Yuguang Niu, Yang Wei, Xiaoming Li, Shilin Wang, and Zhongwei Lin

Recommended Citation

Niu Yuguang, Yang Wei, Li Xiaoming, Wang Shilin, Lin Zhongwei. Design and Simulation Study of Neural Adaptive Power System Stabilizer of DFIG[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(1): 162-169.

双馈风机神经电力系统稳定器设计与仿真研究

牛玉广¹, 杨巍^{2,3}, 李晓明², 王世林², 林忠伟¹(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206;
3. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院工程有限公司, 北京 100120)

摘要: 为提高并网双馈风机的暂态稳定性, 设计了一种基于磁链幅值相角控制(Flux Magnitude Angle Control, FMAC)的神经自适应电力系统稳定器(Neural Adaptive Power System Stabilizer, NPSS)通过在线训练 Elman 神经网络以实现自适应控制, 利用双馈风机雅各比矩阵的符号代替雅各比矩阵运算以减少计算时间, 提高运算速率。主导特征值分析和动态仿真证明神经电力系统稳定器在改善系统阻尼方面的有效性。与同步发电机(Synchronous Generation, SG)安装自动电压调节器(Automatic Voltage Regulator, AVR)和电力系统稳定器的对比仿真表明: 双馈风机安装神经电力系统稳定器具有更好的阻尼特性、电压调节效果和暂态稳定性。

关键词: 双馈风机; 电力系统稳定器; 人工神经网络; 系统阻尼

中图分类号: TP13 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 01-0162-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201701022

Design and Simulation Study of Neural Adaptive Power System Stabilizer of DFIG

Niu Yuguang¹, Yang Wei^{2,3}, Li Xiaoming², Wang Shilin², Lin Zhongwei¹(1. State Key Laboratory for Alternate Electric Power System with Renewable Energy Source, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
3. North China Power Engineering CO. LTD., China Power Consulting Group, Beijing 100120, China)

Abstract: A Flux Magnitude Angle Control (FMAC) strategy based Neural Adaptive Power System Stabilizer (NPSS) was designed to improve the transient stability of grid-connected Double Fed Induction Generators (DFIGs). An online training algorithm based Elman artificial neural network was adopted to achieve adaptive control. For releasing computing burden and improving computing speed, a simplified method was used, where the calculation of jacobian matrix was replaced by the sign of itself. A simplified and generic renewable power system demonstrates the control performance contributions. The results of both dominant eigenvalue analysis and time response simulation illustrate contributions to system damping that the NPSS can make. Performance capabilities superior to those provided by Synchronous Generation (SG) with Automatic Voltage Regulator (AVR) and PSS control demonstrate that NPSS installed DFIG has better performances of system damping, voltage regulation and transient stability.

Keywords: double fed induction generator; power system stabilizer; artificial neural network; system damping

引言

过去十年中, 风电机组是世界上增长速度最快

和装机容量的最大的新能源电源^[1]。其中, 双馈风机以其较低的投资和较灵活的控制方式成为风电机组中的主导型号^[2]。双馈风机在提高风能转换效率的同时, 还可参与电压调节、阻尼控制。随着越来越多的风电机组接入电网, 新的电网准则要求双馈风机对电网的运行提供必要的支持^[3]。

同步发电机转子磁链随转子同步旋转, 其励磁



收稿日期: 2015-04-27 修回日期: 2015-09-17;
基金项目: 国家自然科学基金(51606033, 61203043),
国家重点基础研究发展计划(2012CB215203), 中央高校基本科研业务费专项资助项目;
作者简介: 牛玉广(1964-), 男, 河南, 博士, 教授,
博导, 研究方向为新能源电力系统建模与控制。

<http://www.china-simulation.com>

系统仅可控制转子磁链幅值。而双馈风机本质为异步电机, 其转子磁链幅值、相角均可参与控制。因此, 与同步机相比, 双馈风机在励磁控制方面具有较大的潜力。目前, 我国风电相关标准只规定了双馈风机在电压调节和故障穿越方面需要达到的标准, 并未考虑双馈风机在系统阻尼控制方面的巨大潜力^[3-5]。人工神经网络具有表达任意非线性映射的能力, 而且在线学习功能使它可根据实际工况, 自适应的改变网络权值。人工神经网络技术很好的契合了电力系统非线性、时变的特点, 被成功应用于电力系统辨识、控制领域, 取得了大量的成果^[6-9]。

1 双馈风机暂态特性分析

为了在简化和控制效果之间取得良好的平衡, 本文所用双馈风机模型为基于定子磁链定向的 d-q 旋转坐标系三阶模型^[10]。为简化分析过程, 本文以单机无穷大系统接地故障为例分析双馈风机暂态特性, 并忽略故障时双馈风机网侧逆变器输出电流^[11]。

单机无穷大系统发生接地故障, 其故障时的网路方程可写为:

$$V_s - V_f = jx_{L1}I_s \quad (1)$$

$$(V_f - V_\infty)/jx_{L2} + V_f/jx_g = I_s \quad (2)$$

$$V_s + jx'I_s = E'_g \quad (3)$$

式中: E'_g 为双馈风机内电势; V_f 为故障点对地电压; $V_\infty=1$ 为无穷大母线电压; V_s , I_s 为双馈风机定子端电压、电流; x_{L1} , x_{L2} 和 x_g 分别是故障点前后线路阻抗、接地电抗。为了研究端电压和内电势之间的关系, 消去式(1)~(3)的 V_f 和 I_s 得:

$$\left[1 + \frac{x'}{x_{L1}} \left(1 - \frac{x_{L2}x_g}{x_{L2}x_{L1} + x_{L2}x_g + x_{L1}x_g} \right) \right] V_s = E'_g + \frac{x'}{x_{L1}} \left(\frac{x_{L2}x_g}{x_{L2}x_{L1} + x_{L2}x_g + x_{L1}x_g} \right) V_\infty \quad (4)$$

结合 $E'_g = |E'_g| \angle \delta_{dfg}$, 由此可得 x-y 坐标系中端电压幅值 $|V_s|$ 为:

$$|V_s| = \sqrt{(a|E'_g| \cos \delta_{dfg} + b)^2 + (a|E'_g| \sin \delta_{dfg})^2} = \sqrt{a^2|E'_g|^2 + 2ab|E'_g| \cos \delta_{dfg} + b^2} \quad (5)$$

$$a = \left[1 + \frac{x'}{x_{L1}} \left(1 - \frac{x_{L2}x_g}{x_{L2}x_{L1} + x_{L2}x_g + x_{L1}x_g} \right) \right]^{-1},$$

$$b = \frac{\frac{x'}{x_{L1}} \left(\frac{x_{L2}x_g}{x_{L2}x_{L1} + x_{L2}x_g + x_{L1}x_g} \right)}{1 + \frac{x'}{x_{L1}} \left(1 - \frac{x_{L2}x_g}{x_{L2}x_{L1} + x_{L2}x_g + x_{L1}x_g} \right)}.$$

由式(5)可以看出, $|V_s|$ 对 δ_{dfg} 较敏感, 当 δ_{dfg} 突变时, 将引起端电压跌落。在某些极端情况下, 在故障初期, δ_{dfg} 即可突变 180° , 导致端电压大幅度跌落。因此, 如能对 δ_{dfg} 进行有效控制, 将其变化限制在一定范围内(即提高双馈风机功角阻尼), 可显著降低端电压跌落。从而使得在电网故障时, 双馈风机不至于脱网, 提高电力系统暂态稳定性。

2 基于 FMAC 的 NPSS 设计

一种双馈风机 PI 串级 FMAC 策略^[12]和传统电力系统稳定器(Classical PSS, CPSS)如图 1 所示。图中各控制器参数见附录 A3, $g_s(s)$, $g_m(s)$ 和 $g_a(s)$ 为超前/滞后环节, 其作用为保证 FMAC 具有合适的稳定裕度。

电力系统稳定器输出信号 V_{pss} 由 δ_g 侧加入。这样, 就实现了自动电压调节回路和电力系统稳定器控制回路的解耦。传统电力系统稳定器输入信号可选为有功功率输出、终端电压、转子转速信号等。

Elman 神经网络在前向层引入承接层, 从而具备“记忆”能力。因此, Elman 神经网络具有良好的动态特性和递归作用, 更适合动态系统的实时辨识和控制^[13]。Elman 神经网络输入/输出关系为:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_k = W_k^U \Delta \mathbf{y} + W_k^C \mathbf{x}_k^C, & \mathbf{x}_k^H = f(\mathbf{v}_k) \\ \mathbf{x}_k^C = \alpha \mathbf{x}_{k-1}^H, & u_{pss,k} = g(W_k^Y \mathbf{x}_k^H) \end{cases} \quad (6)$$

式中: W^U , W^X , W^Y 分别为输入层, 隐层和输出层权值矩阵; Δy (双馈风机输出向量动偏差)为神经网络输入向量; u_{pss} 为神经网络输出信号; $\mathbf{x}^H$ 为隐层输出向量; $\mathbf{v}$ 为承接层输入向量; $\mathbf{x}^C$ 为承接层输出向量; α 为承接层自反馈增益; $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 为激发函数; 下角标 k 表示第 k 个采样周期。

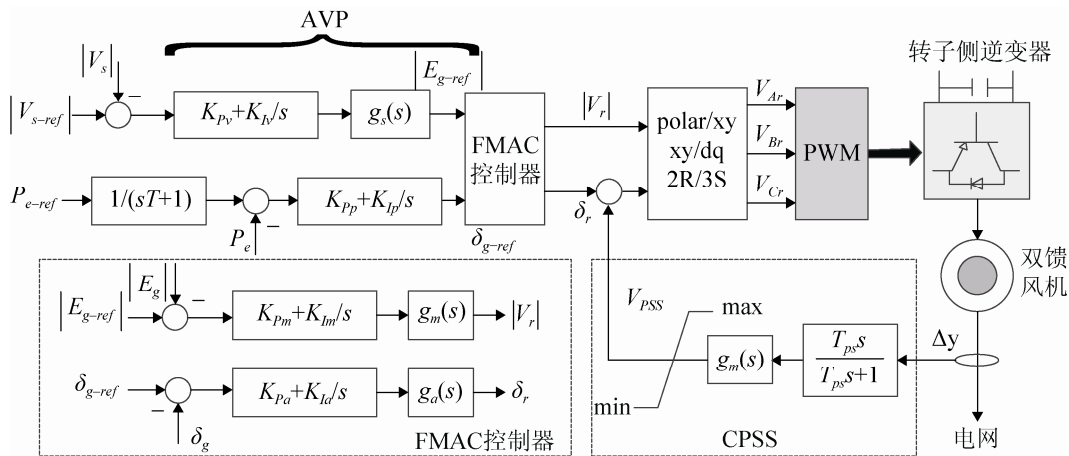


图 1 磁链幅值相角控制策略
Fig.1 Block diagram of FMAC strategy

本文取双馈风机输出信号动偏差 Δy 为 Elman 神经网络输入信号, 则 NPSS 性能函数可定义为:

$$J_k = 1/2 \Delta y_k^T \Delta y_k + h/2 u_{pss,k}^2 \quad (7)$$

式中: Δ 表示偏差值; $h > 0$ 为惩罚系数。如取 $\Delta y_k = \Delta P_{e,k}$, 则性能函数可重写为:

$$J_k = 1/2 (-\Delta P_{e,k})^2 + h/2 u_{pss,k}^2 \quad (8)$$

利用梯度下降法调整 Elman 神经网络权值矩阵, 则输出权值矩阵 W_k^Y 迭代计算公式为:

$$W_k^Y = W_{k-1}^Y - \eta \nabla_{W_k^Y} J_k \quad (9)$$

式中: η 为学习率; $\nabla_{W_k^Y} J_k$ 为 J 对于 W^Y 的梯度。

$$\nabla_{W_k^Y} J_k = \frac{\partial J_k}{\partial u_{pss,k}} \frac{\partial u_{pss,k}}{\partial W_k^Y} = \left[P_{e,k} \frac{\partial \Delta P_{e,k}}{\partial u_{pss,k}} + h u_{pss,k} \right] \frac{\partial u_{pss,k}}{\partial W_k^Y} \quad (10)$$

式中: $\partial u_{pss,k} / \partial W_k^Y$ 可根据式(6)由误差反传算法得到; $\partial \Delta P_{e,k} / \partial u_{pss,k}$ 为双馈风机雅各比(Jacobian)矩阵。对于双馈风机这样的多入多出系统, 求解其雅各比矩阵并不容易。目前已有的解法均较为复杂, 计算量较大。而励磁系统为快速控制系统, 相对于工业级中央处理器运算速度, 常规解法无法满足控制快速性的要求。为了在算法简化和控制效果之间求得平衡, 本文以雅各比矩阵的符号 $\text{sign}(\partial \Delta P_{e,k} / \partial u_{pss,k})$ 代替原雅各比矩阵^[14], 以降低运算量。因此, 式(10)可写为:

$$\nabla_{W_k^Y} J_k = \left[P_{e,k} \text{sign} \left(\frac{\partial \Delta P_{e,k}}{\partial u_{pss,k}} \right) + h u_{pss,k} \right] \frac{\partial u_{pss,k}}{\partial W_k^Y} \quad (11)$$

图 2 为转差率 s 从 0.2(对应最低转速)增加到 -0.2(对应最高转速)过程中, 转子磁链变化情况。由图 2 可知, 在次同步转速下, 随着转速的增加, 双馈风机输出有功将增加, 但磁链相角随输出功率增加而减小。即, 次同步下磁链相角与输出功率成反比。同理, 超同步转速下磁链相角与输出功率成正比。由此得到:

$$\text{sign}(\partial \Delta P_{e,k} / \partial u_{pss,k}) = \text{sign}(-s) \quad (12)$$

结合式(11), (12)得到:

$$\nabla_{W_k^Y} J_k = \left[P_{e,k} \text{sign}(-s) + h u_{pss,k} \right] \frac{\partial u_{pss,k}}{\partial W_k^Y} \quad (13)$$

引入动量因子以提高 Elman 神经网络稳定性, 则梯度可重新写为:

$$\nabla_{W_{k+1}^Y} J_k = \nabla_{W_{k-1}^Y} J_{k-1} + (1 + \lambda) \nabla_{W_{k-2}^Y} J_{k-2} a \quad (14)$$

因此, 式(9)可写为:

$$W_k^Y = W_{k-1}^Y - \eta [\nabla_{W_{k-1}^Y} J_{k-1} + (1 + \lambda) \nabla_{W_{k-2}^Y} J_{k-2}] \quad (15)$$

类似的, 可得到 W^U , W^C 的在线更新公式。本文以单一变量为例说明了 NPSS 设计过程, 但 NPSS 输入信号并不限定为单变量。实际使用中, NPSS 可根据现场工况选择适合的输入信号。当然随着输入信号的增多, 其雅各比矩阵将变得更加复杂。

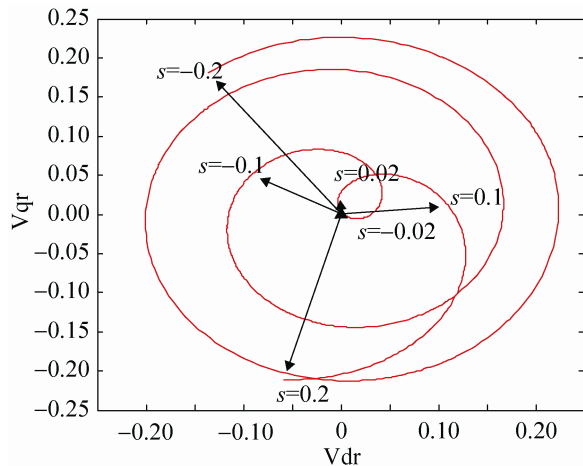


图 2 转子电压向量变化图

Fig.2 Rotor voltage vector with various slip

3 主导特征值分析与动态仿真

本文在 Matlab/Simulink 环境下搭建了一个简化且具有普遍意义的电力系统模型, 如图 3 所示。图中, SG_3 为等值机, 代表外部电力系统, SG_1 , SG_2 代表同步发电机组, 负荷 Load 以恒定阻抗表示。在后续有关双馈风机仿真中, SG_2 将被基于双馈风机的风电场 WF 取代。以上各模型及控制器参数见附录。为了区分这两个模型, 仅包含同步机的电力系统模型简称为传统电力系统(Conventional Power System, CPS), 包含双馈风机的电力系统模型简称为新能源电力系统(Renewable Power System, RPS)。

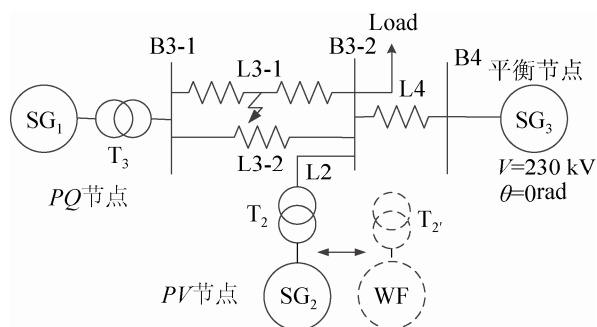


图 3 电力系统模型

Fig.3 Configuration of power system model

3.1 SG 安装 NPSS 情况

传统电力系统安装 CPSS 和 NPSS 时的主导特

征值分布如图 4 所示。其中, PSS 输入信号均为 ΔP_e , $P_{e1}=7.3$ MW, $P_{e2}=6.1$ MW。

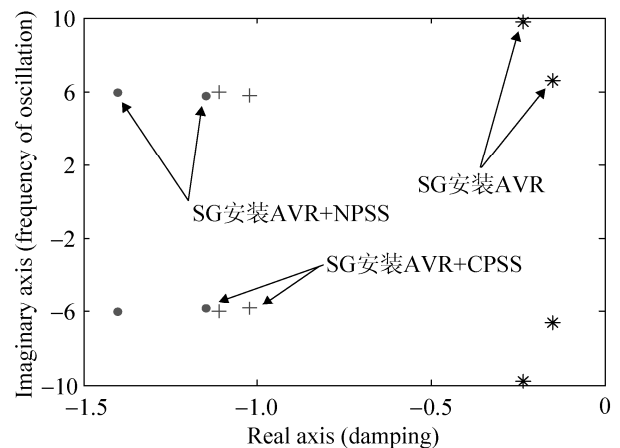


图 4 CPS 在 SG 安装不同 PSS 主导特征值分布

Fig.4 Dominant eigenvalue of CPS with various PSSs

从图 4 可以看出, 不论同步机是否安装电力系统稳定器, 系统均存在两对共轭主导极点。例如当同步机仅安装 AVR 时, 系统主导特征值为 $-0.234 \pm j9.776$ 和 $-0.152 \pm j6.603$, 所对应的阻尼系数为 0.023 9 和 0.022 9。当同步机安装 AVR+CPSS 时, 系统主导特征值分别为 $-1.023 \pm j5.78$ 和 $-1.403 \pm j5.959$, 所对应的阻尼系数分别为 0.104 6 和 0.168 1。当同步机安装 AVR+NPSS 时, 系统的主导极点为 $-1.148 \pm j5.78$ 和 $-1.403 \pm j5.959$, 所对应的阻尼系数分别为 0.117 4 和 0.212 4。从以上分析可知, 同步机安装 CPSS 和 NPSS 均可提高系统阻尼, 其中 NPSS 阻尼控制效果优于 CPSS。

为了进一步研究同步机安装 CPSS 和 NPSS 时的阻尼控制效果, 本文在线路 L3-1 中间施加 3 项接地故障, 响应曲线见图 5。图中: Δ 为稳态偏差值; P_e 为输出有功功率; V_t 为终端电压幅值; δ 为同步机转子角; $P_{e1}=7.3$ MW。从图 5 中可以看出, 当 SG 仅安装 AVR 时, 系统阻尼较弱, 在故障发生 5 s 后 SG_1 仍未进入稳态。当 SG 安装 AVR+CPSS 后, SG_1 和 SG_2 大约分别在 4 s 和 3 s 后进入稳态; 当 SG 安装 AVR+NPSS 后, SG_1 和 SG_2 分别在 2.5 s 和 2 s 后进入稳态, 系统阻尼得到了很大的提高。以上动态仿真结果验证了图 3 中主导特征值分析结论。

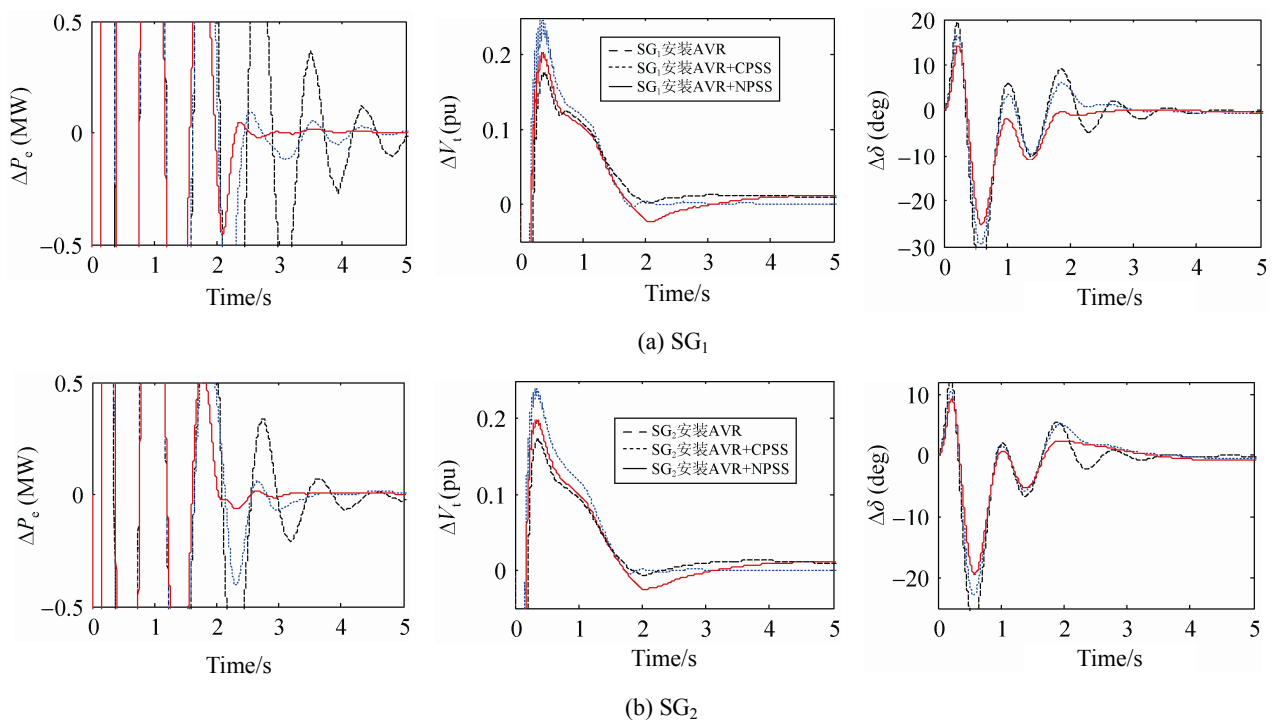


图 5 SG 安装不同 PSS 的三项接地故障响应曲线
Fig.5 Fault response of SG with various PSSs

从 SG_1 , SG_2 端电压曲线可以看出, 同步机安装 PSS 后其电压调节品质均有一定程度的下降。这是因为同步机转子磁链随转子同步旋转, 因此同步机 AVR 和 PSS 回路的被调量只能是转子磁链幅值。这就导致了 AVR 和 PSS 回路之间存在严重的耦合。因此造成同步机阻尼控制效果提高的同时, 必然牺牲电压调节质量。

3.2 DFIG 安装 NPSS 情况

新能源电力系统在双馈风机安装不同 PSS 时的主导特征值如图 6 所示, 其中 $P_{el}=7.3$ MW。从中可以发现, 当 SG_2 被双馈风场 WF 替代后, 新能源电力系统只有一个主导特征值。在双馈风机不安装任何 PSS 的情况下, RPS 主导特征值主要集中在实轴-0.6 左右, 虚轴 ± 6 上下, 其对应的阻尼系数在 0.086~0.102 之间。该值较为接近传统电力系统中同步机安装 AVR+CPSS 时的阻尼系数。当双馈风机分别安装 CPSS 和 NPSS 后, RPS 主导特征值向复平面左半部分移动很长一段距离, 表明系统

阻尼得到了很大的提高。不同转差率所对应的系统阻尼系数如表 1 所示。从表 1 中可以看出: 双馈风机安装 CPSS 或 NPSS 时, 系统阻尼与转速成正比。与 CPSS 相比, NPSS 在全工况范围内均表现出较好的阻尼控制效果。

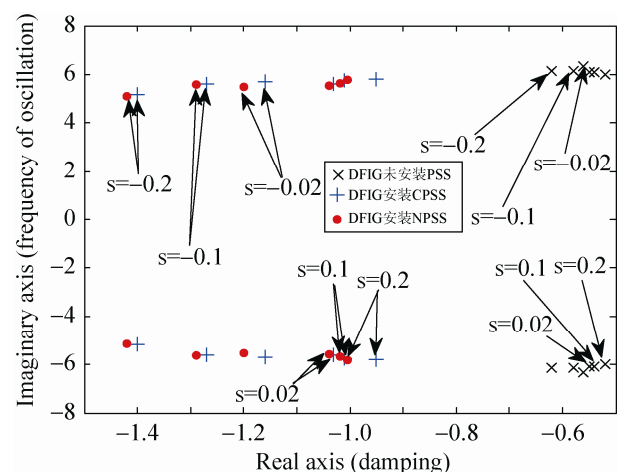


图 6 RPS 在 DFIG 安装不同 PSS 主导特征值分布
Fig.6 Dominant eigenvalue of RPS with various PSSs

表 1 不同转差率下的 RPS 阻尼

Tab.1	damping performance of RPS with various slip					
S	0.2	0.1	0.02	-0.02	-0.1	-0.2
CPSS	0.161	0.173	0.181	0.199	0.222	0.262
NPSS	0.171	0.178	0.184	0.213	0.225	0.267

为了研究双馈风机安装不同 PSS 情况下的暂态行为, 本文分别在新能源电力系统不同位置、不同工况施加三相接地故障。在接下来的动态仿真中, 以下两点需要说明:

1、为了充分说明双馈风机在暂态控制方面的能力, 在本节主导特征值分析和动态仿真中, 同步机 SG₁ 仅安装 AVR;

2、为了得到双馈风机完整的故障响应曲线, 本文仿真中均为考虑双馈风机跳闸保护系统。

情况 1: 在 RPS 系统施加与 3.1 节相同位置、相同参数的三项接地故障, 动态响应曲线见图 7。图中: V_{dc} 为双馈风机直流母线电压, 其中 $P_{el}=7.3$ MW, $P_{ewf}=2.07$ MW, $s=0.2$ 。在本节动态仿真中, NPSS 输入信号为双馈风机三阶模型状态变量: E'_d, E'_q (E'_g 在 dq 轴分量) 和输出有功功率 P_e 。

从图 7 可见: NPSS 控制下的端电压跌落值最小。因而双馈风机在故障中可以发出更多的有功功率(或吸收更少的有功功率), 降低了直流母线电压 V_{dc} 爬升速率和峰值。而较低的直流母线电压有助于提高双馈风机故障穿越能力。同时由发电机端电量曲线可以看出, 新能源电力系统阻尼在 NPSS 控制下也得到了极大的提高。尽管 CPSS 也可提高系统的阻尼, 但在故障中 CPSS 无法改善端电压跌落情况, 使得较多有功功率累积在直流母线中, 导致 V_{dc} 在故障中快速爬升。较高的 V_{dc} 将触发双馈风机保护系统动作, 导致风机跳闸脱网, 限制故障穿越能力。

与 CPSS 仅可选取单变量作为输入信号不同, NPSS 可灵活选择多个变量组合作为输入信号, 在目标函数的协调下达到其控制目的。本节中 NPSS 性能函数可写为:

$$J_k = 1/2 \Delta[E'_d, E'_q, P_e]_k^T \Delta[E'_d, E'_q, P_e]_k + h/2 u_{pss,k}^2 \quad (16)$$

该性能函数显然可将暂态电动势 E'_g 的变化限制在一定范围内, 从而改善故障中端电压 V_t 跌落情况; 有功功率动偏差 ΔP_e 的加入又可显著改善系统的阻尼特性。因此 NPSS 不仅可以提高系统阻尼, 同时也可有效改善故障中端电压跌落情况, 从而极大提高双馈风机故障穿越能力和系统暂态稳定性。而 CPSS 仅可选取单变量作为输入信号, 造成其性能指标也较为单一。故障中 CPSS 无法有效的抑制 E'_d, E'_q 的突变, 从而对端电压跌落没有明确的改善效果。

情况 2: 为了验证 NPSS 在双馈风机全工况范围内控制效果, 本文另选一工况点、在双馈风机出口线路 L2 中间施加三项接地故障, 响应曲线见图 8, $P_{el}=7.3$ MW, $P_{ewf}=5.4$ MW, $s=-0.02$ 。

由图 2 可知: 当双馈风机接近同步转速时, 其转子磁链幅值接近于零; 双馈风机在次同步状态和超同步状态之间过渡时, 其转子磁链幅值变化很小, 磁链相角变化幅度却很大。较小的磁链幅值和剧烈变化的磁链相角减小了双馈风机在 FMAC 控制策略下的调节余度。再加上本次故障位置距离双馈风机较近。因此在故障后, 未安装 PSS 的双馈风机输出功率出现了大幅度振荡。同 CPSS 相比, NPSS 在这种恶劣的工况下表现出了较好的控制效果。图 7、图 8 仿真结果验证了图 6 主导特征值分析结论。

双馈风机本身为异步电机, 其转子磁链幅值、相角均可参与控制, 很容易实现 AVR 和 PSS 回路之间的解耦。因此双馈风机在阻尼控制中并没有电压调节质量的下降。另外, 对比特征值分析和动态仿真结果可知: NPSS 的动态仿真效果明显好于其特征值分析结果。究其原因为: 主导特征值分析研究的对象为稳态工况下的线性化模型。当电力系统遭遇大扰动时, 其结构和参数将发生剧烈的变化。因而基于稳态工况的特征值分析结果无法全面反映这种大扰动下的电力系统强非线性特性。

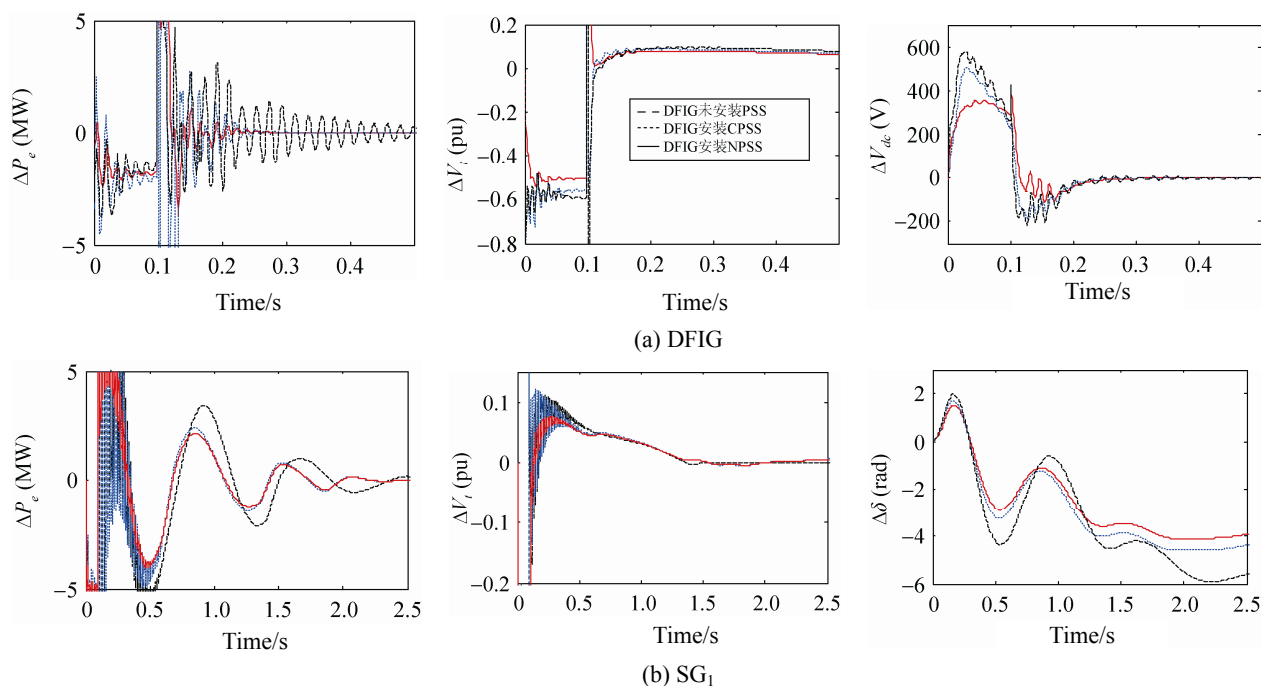


图7 DFIG安装不同PSS的三项接地故障响应曲线1

Fig.7 Fault 1 response of DFIG with various PSSs

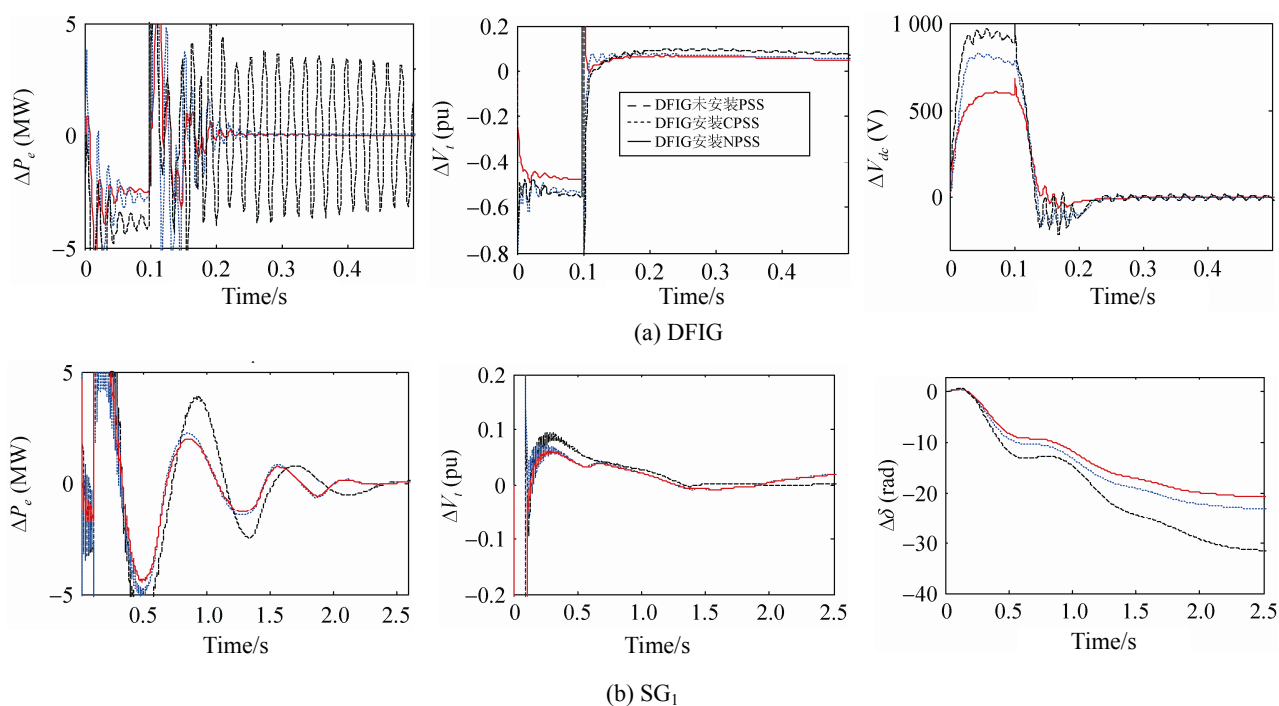


图8 DFIG安装不同PSS的三项接地故障响应曲线2

Fig.8 Fault 2 response of DFIG with various PSSs

4 结论

本文设计了神经电力系统稳定器并将其应用于双馈风机转子侧控制系统中,主导特征值分析和动态仿真说明:与传统电力系统稳定器相比,神经

自适应电力系统稳定器可显著提高电力系统阻尼,改善系统动态特性。

本文表明:双馈风机在暂态控制方面具有较大的潜力,特别是在阻尼控制方面。与同步机相比,

双馈风机实现了阻尼控制和电压调节回路之间的解耦。从而在阻尼控制过程中, 未出现电压调节质量的下降。因此在制定风电相关标准、准则时, 应当充分考虑双馈风机在这方面的巨大潜力。

参考文献:

- [1] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 1-8.(Liu Ji Zhen. Basic Issues of the Utilization of Large-scale Renewable Power With High Security and Efficiency [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 1-8.)
- [2] 李梅, 李建林, 赵斌, 等. 双馈感应式风力发电机的电压跌落响应分析 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(22): 5243-5245.(Li Mei, Li Jianlin, Zhao Bing, et. al. Response of wind turbine with DFIG during grid voltage dip [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2007, 19(22): 5243-5245.)
- [3] 电网运行与控制标准化技术委员会. DL/T 1040-2007 电网运行准则 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.(Standardization Technical Committee of power grid operation and control. DL/T 1040-2007 The grid operation code [S]. Beijing: china electric power press, 2007.)
- [4] 国家标准化管理委员会. GB/T19963-2011 风电场接入电力系统技术规定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.(Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T19963-2011 Technical rule for connecting wind farm to power system [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.)
- [5] 国家能源局. NB/T31003-2011 大型风电场并网设计技术规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.(National energy administration. NB/T31003-2011 Design regulation for large-scale wind power connecting to the system [S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2011.)
- [6] 徐庆宏, 戴先中. 多机电力系统附加 NNPSS 的在线学习神经网络逆励磁控制器 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 25-31. (Xu Qinghong, Dai Xianzhong. Online learning ANN-inversion excitation controller with NNPSS for multi-machine power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 25-31.)
- [7] Lin W M, Hong C M, Chen C H. Neural-network-based MPPT control of a stand-alone hybrid power generation system [J]. Power Electronics, IEEE Transactions on (S0885-8993), 2011, 26(12): 3571-3581.
- [8] Lin W M, Hong C M. A new Elman neural network-based control algorithm for adjustable pitch variable speed wind energy conversion systems [J]. Power Electronics, IEEE Transactions on (S0885-8993), 2011, 26(2): 473-481.
- [9] Dounis A I, Kofinas P, Papadakis G, et al. A direct adaptive neural control for maximum power point tracking of photovoltaic system [J]. Solar Energy (S0038-092X), 2015, 115: 145-165.
- [10] J B Ekanayake, L Holdsworth, N Jenkin. Comparison of 5th order and 3rd order machine models for doubly fed induction generator (DFIG) with turbines [J]. Elect Power Syst. Res (S0378-7796), 2003, 67(3): 2207-2215.
- [11] 卜思齐, 杜文娟, 王海风. 双馈风力发电机故障穿越改进控制策略 [J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(1): 33-39.(Bu Siqu, Du Wenjuan, Wang Haifeng. An improved control strategy with ride-through capability for double fed induction generator [J]. Journal of electric power science and technology, 2012, 27(1): 33-39.)
- [12] Anaya L O, Michael H F, Nicholas J. Rotor flux magnitude and angle control strategy for double fed induction generators [J]. Wind Energy (S1095-4244), 2006, 9(4): 479-495.
- [13] Pham D T, Liu X. Training of Elman networks and dynamic system modeling [J]. International Journal of System Science (S0020-7721), 1996, 27(2): 221-226.
- [14] Saerens M, Soquet A. Neural controller based on back-propagation algorithm [J]. IEE Proceedings, Part F: Radar and Signal Processing (S0956-375X), 1991, 138(1): 55-62.

附录

A1. 同步机参数(基于各自容量 MW 的标么值)

N	X_d	X'_d	X_q	H	T_{do}	T_E	D	MW
1	0.4	0.15	0.24	7.13	5.0	0.13	4.0	15
2	0.62	0.11	0.62	8.90	5.0	0.10	2.0	12

A2. 双馈风机参数(基于标么值 $S_b=9$ MW)

$R_s=0.00706$, $L_s=0.171$, $R_r=0.005$, $L_r=0.156$, $L_m=2.9$, $H=5.04$, $F=0.01$

逆变器容量为: 4.5MW(50% S_b)。

A3. 控制器参数

同步机 AVR: 同步机 AVR 控制器采用比例结构, SG_1, SG_2 的 AVR 控制器比例增益均为 10。

CPSS 写为如下形式:

$$G_{cpss} = K \left(\frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} \frac{T_3 s + 1}{T_4 s + 1} \right)$$

CPSS_{SG1}: $K=2.5$, $T_1=0.006$, $T_2=1$, $T_3=T_4=0$;

CPSS_{SG2}: $K=2.2$, $T_1=0.006$, $T_2=1.05$, $T_3=T_4=0$ 。

(下转第 180 页)