

基于模糊控制的风电场群并网点电压调节方法

王振浩, 杜虹锦, 李国庆

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 132012)

摘 要: 为改善电力系统电压跌落状态下双馈型风电场群的电压性能, 采用模糊协调控制方法考虑风电并网系统同步发电机自动电压调节器(AVR)和电力系统稳定器(PSS)之间的同步调节问题, 通过优化设计模糊控制器减轻电网扰动情况下 AVR 和 PSS 之间的相互制约, 并调整二者增益使其提供最佳性能从而补偿并网点电压降落、降低双馈风力机的无功需求。仿真结果表明, 通过 AVR 和 PSS 之间的模糊协调控制能够有效减少风电并网点电压跌落, 加快稳态电压恢复, 降低风场无功损耗, 改善风电并网系统的电压稳定。

关键词: 风电场群; 模糊协调; 自动电压调节器(AVR); 电力系统稳定器(PSS)

中图分类号: TM761⁺.1

文献标识码: A

0 引 言

双馈风力机(doubly fed induction generators, DFIG)近年来应用较为广泛, 利用其无功调控能力来实现风电场无功补偿已成为业界共识^[1]。随着 DFIG 在风电系统中所占比重不断增加, 系统暂态稳定性受 DFIG 特性影响愈加明显^[2]。若减少 DFIG 的无功吸收, 即可降低同步电机的无功注入, 有助于缓解转子角剧烈波动等问题^[3]。

目前大部分的研究集中在如何增强双馈风场公共耦合点(point of common coupling, PCC)电压性能的问题上, 主要有 2 种控制策略: 1) 从电网侧分析, 可采用的控制工具有自动电压调节器(automatic voltage regulator, AVR)、电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)、动态补偿设备; 2) 从风场侧分析, 可通过控制换流器以维持 PCC 处电压稳定。

国内多数文献研究提出通过补偿无功进行调节实现电压稳定, 忽略了 AVR 和 PSS 协调在维持电压稳定上的重要意义。同步发电机的励磁系统对发电机乃至整个系统的可靠性都起到重要作用^[4]。文献[5]提出在同步发电机中安装 PSS, 并通过差分进化法解决风电并网系统中 AVR 和 PSS 的参数调节问题, 从而改善风电并网系统稳定性。该方法有效

维持并网点电压稳定, 但差分进化法后期收敛速度较慢, 且易陷入局部极值问题, 在实际应用中有一定局限性。

本文综合考虑转子相角稳定和电压稳定, 以量化后同步发电机的转子角差和机端电压差为输入信号, 采用模糊控制器对 AVR 和 PSS 参数进行最优调节, 改善系统小信号稳定性, 通过减弱系统振荡以改善双馈风场 PCC 处的电压性能, 实现增强系统暂态稳定的目的。

1 风电场群并网点电压调节方法

1.1 双馈风力机工作原理分析

如图 1 所示, DFIG 结构与绕线式异步电机类似, 其定子与电网直接相连, 转子通过 AC-DC-AC 换流器与电网相连。交流励磁电源为转子绕组提供频率、相位、幅值均可调节的励磁电流, 从而实现恒频输出^[6]。换流器有效控制转子电流以跟踪不同时刻的风速, 其额定功率约为 DFIG 额定容量的 25%~30%。图中, P_r 为风力机输入励磁功率, P_s 、 Q_s 分别为定子输出的有功、无功, P_r 、 Q_r 分别为发电机转子从电网吸收的有功、无功, P_c 、 Q_c 分别为网侧换流器交流端有功、无功, P_d 、 Q_d 分别为直流支撑电容器的有功、无功。

收稿日期: 2017-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(51377016)

通信作者: 王振浩(1964—), 男, 教授、硕士生导师, 主要从事输变电设备运行状态监测与评估等方面的研究。zhenhaowang@126.com

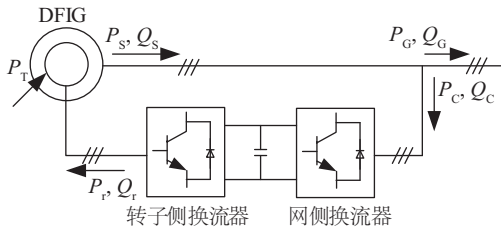


图1 双馈风电机组的拓扑结构

Fig. 1 Topology of DFIG

1.2 考虑AVR和PSS的PCC处电压调节

本文所述系统中所有同步发电机均装有 AVR 和 PSS 装置。AVR 为发电机的机端电压提供可控性,维持机端电压在稳定区间内,当电力系统遭受剧烈扰动时保证其稳定运行。AVR 的 1 阶静态模型如图 2 所示。图中, V_t 为发电机机端电压量测值, V_{ref} 为机端电压给定值, V_s 为无穷大系统电压, V_{Rmax} 、 V_{Rmin} 分别为电压调整上限值和下限值, T_R 为量测环节时间常数, T_A 为电压调节器时间常数, K_A 为励磁放大倍数, E_{FD} 为输出电动势。

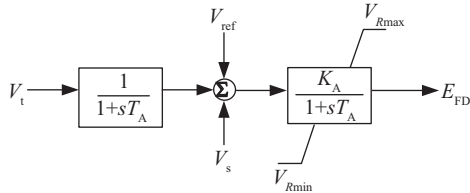


图2 AVR模型

Fig. 2 AVR structure

随电压波动问题的不断出现,考虑在早期仅安装 AVR 的同步发电机加装 PSS 装置作为第 2 控制器以增强系统的小信号稳定。PSS 能够使同步发电机转子产生阻尼转矩,并通过励磁机的输入使电磁转矩相位滞后得到相应补偿^[7]。传统 PSS 模型包含应用 2 个超前、滞后的传递函数,其传递函数 $G(s)$ 可表示为:

$$G(s) = K_{PSS} \frac{sT_w}{1+sT_w} \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \frac{1+sT_3}{1+sT_4} \quad (1)$$

式中, K_{PSS} ——放大增益; T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 ——相位补偿环节时间常数; T_w ——隔直环节的时间常数。

同步发电机电磁转矩或阻尼转矩的不足是造成系统不稳定的重要原因。AVR 具有高增益、快响应和可补偿同步转矩的特点,对改善电压调节能力、提高大信号暂态稳定性具有较大优势。但 AVR

高增益、快响应的特点,会降低电磁振荡模式下的阻尼,对保证系统小信号稳定存在不利影响^[8]。PSS 把来源于系统中的振荡信号传递到 AVR,在励磁控制系统中形成闭环,通过 AVR 的自动控制作用来产生对这些振荡的阻尼效果,达到增加系统阻尼的目的。二者控制响应相互冲突,在提高电压稳定性方面相互制约。因此,欲获得系统合理的振荡阻尼和电压调节能力,应实现 AVR 和 PSS 同步调节。本文采用模糊控制法,通过调整 AVR 和 PSS 在紧急情况下协调动作,实现电压跌落下 PCC 处的电压恢复,并降低双馈风电场的无功需求。

2 模糊控制法

模糊逻辑方法是一种决策制定方法,模仿人脑对不确定性概念的判断、推理方式,处理未知模型或不确定性系统的问题。模糊控制是以模糊逻辑方法为基础的一种智能控制方法。它无需精确的数学模型,却能合理应用于动态或高度非线性系统,对过程和参数的变化有较强的适应能力。风电并网系统是一个高度复杂的系统,模糊控制可以有效弥补传统控制方法的不足,且具有简单性和高效性。因此,模糊控制可以作为解决电力系统稳定问题的有效工具。

模糊控制器的设计有步骤如下^[9]:

- 1)理解系统动态行为特征。定义状态、输入/输出控制变量和他们的变化范围。
- 2)确定各输入量的模糊语言取值和相应的隶属度函数。为每个输入/输出变量确定隶属度函数的范围,并完成模糊化。
- 3)构造模糊规则。使系统能够根据该规则运作,并通过对规则强弱关系的分配来决定如何执行操作。
- 4)解模糊。主要用于将推理得到的控制量转化为控制输出。

3 模糊控制法在风电并网系统中的应用

AVR 和 PSS 本质上均按照系统的标准控制点设计,二者相辅相成又相互制约。系统发生故障情况时,本文采用模糊控制器获取 AVR 和 PSS 出力情况,从而实现二者间的协调。模糊控制器主要由模糊化接口、模糊推理规则表和解模糊化接口 3 个

部分构成。图 3 为模糊控制器的设计原理框图。其中, $\Delta\delta'$ 、 $\Delta V'$ 为经量化的角差和电压差, K_p 、 K_A 分别为 PSS 和 AVR 的增益系数。

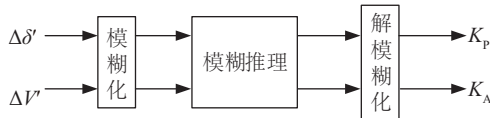


图3 模糊控制器
Fig. 3 Fuzzy coordinator

3.1 量化方法和隶属度函数

本文所提出模糊控制器的控制结构包含 2 个输入和 2 个输出, 其中输入信号的选择至关重要, 直接影响最终控制结果。当选择机端电压偏差或转子角差作为输入信号时, 系统遭受巨烈扰动可能导致差值较大, 因此需要采用量化方法来限制这些偏差。本文提出一种针对给定参数(X)的量化方法, 如图 4 所示。

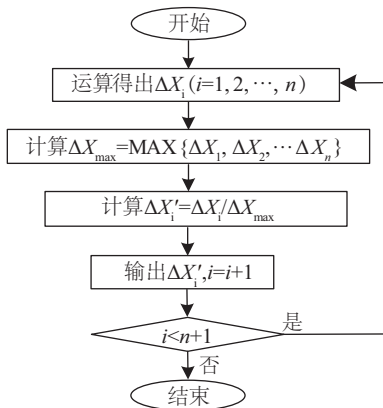


图4 量化方法
Fig. 4 Normalization method

同步发电机转子角差和机端电压偏差经过量化后作为输入信号进入模糊化过程, 正确构造隶属度函数是模糊协调的关键。

首先将基本论域中的精确量经量化因子转化成模糊集论域中相应值, 然后根据隶属度函数确定其相应的语言变量。模糊论域为 $[-1, 1]$, 对应的语言变量值分别定义为负大(negative large, NL)、负小(negative small, NS)、零(zero, ZR)、正小(positive small, PS)和正大(positive large, PL), 并设定输入和输出变量的隶属度函数相同。本文建立基于梯形法的输入和输出信号隶属度函数, 如图 5 所示。

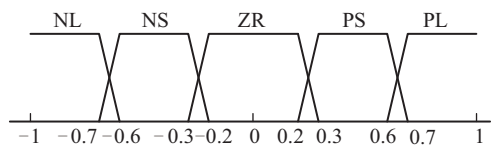


图5 输入和输出变量的隶属度函数
Fig. 5 Membership function for inputs and outputs variables

3.2 模糊规则

模糊规则是模糊控制器的核心。结合现有文献知识和实践控制经验, 本文以保证系统具有最佳动态、静态性能为原则制定的模糊规则, 如表 1 所示。

表1 PSS和AVR增益模糊规则
Table 1 Fuzzy rule table for PSS & AVR gain

PSS						
K_p	$\Delta V'$					
	NL	NS	ZR	PS	PL	
$\Delta\delta'$	NL	PS	ZR	ZR	NS	NS
	NS	PL	PS	ZR	ZR	PS
	ZR	ZR	ZR	NS	ZR	ZR
	PS	PS	NS	ZR	PS	PS
	PL	NS	ZR	PS	ZR	NL
AVR						
K_A	$\Delta V'$					
	NL	NS	ZR	PS	PL	
$\Delta\delta'$	NL	PL	PL	PS	ZR	NS
	NS	PL	PS	PS	PS	ZR
	ZR	PS	PS	PS	PS	ZR
	PS	NS	NS	NL	NL	NL
	PL	PS	PS	ZR	PL	NL

注: K_p 、 K_A —PSS 和 AVR 的增益系数; $\Delta V'$ —量化后的机端电压偏差; $\Delta\delta'$ ——量化后的转子角差。

3.3 解模糊化

解模糊化是将一个模糊量转化成一个精确量并作用于被控对象的过程。其中模糊量由模糊推理得到, 而模糊推理系统采用 Mamdani 算法实现。常用的解模糊化方法很多, 本文采用加权平均法。加权平均法是模糊控制系统中应用比较广泛的一种方法, 即通过隶属度函数的加权平均值确定待输出的精确值, 计算公式为:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^m k_i \mu_{\tilde{u}_i}(x_i)}{\sum_{i=1}^m \mu_{\tilde{u}_i}(x_i)} \quad (2)$$

式中, n ——解模糊后精确值; m ——模糊集合所含信息数; k_i ——加权系数; $\mu_{\tilde{u}_i}(x_i)$ ——隶属度函数。

一般取与隶属度函数相对应的论域元素, 即 $\mu_{\tilde{u}_i}(x_i)$ 的 k_i 取为 x_i , 因此式(2)可表示为:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^m x_i \mu_{\tilde{u}_i}(x_i)}{\sum_{i=1}^m \mu_{\tilde{u}_i}(x_i)} \quad (3)$$

利用模糊控制器保证 AVR 和 PSS 间的协调动作, 可增强风电并网系统的稳定性, 调节 PCC 处电压, 以维持含风电并网系统的动态、静态稳定。

4 算例分析

4.1 算例系统

本文采用图 6 所示 IEEE 10 机 39 节点系统作为测试系统, 其中 30~39 号节点为发电机节点。

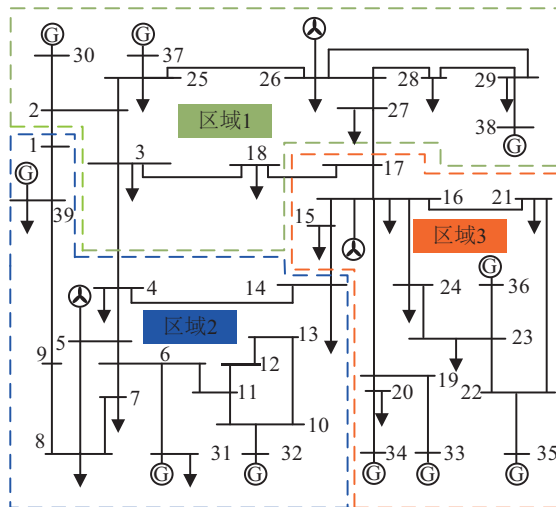


图 6 39 节点电力系统

Fig. 6 39 bus power system

风电场群均匀分布在系统的各个区域, 风电场中的风力机为等值风力机, 经变压器和输电线路接入电网。故障情况下, 风场 PCC 处发生电压骤降, 将使风力机脱网甚至损毁换流器, 因此故障发生后需通过额外的控制器缓解电压骤降对系统造成的冲击。

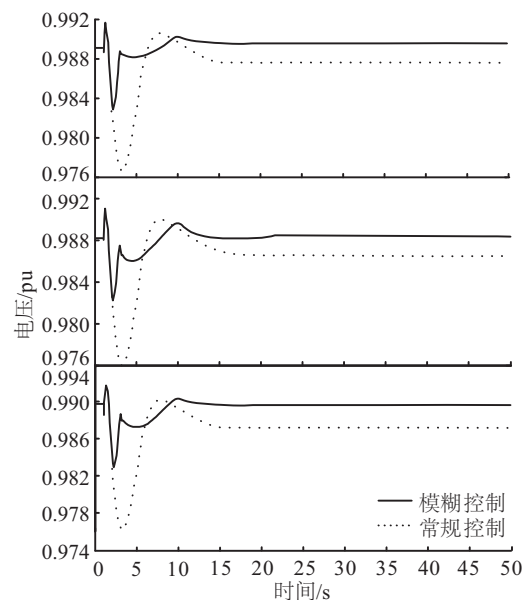
根据发电机转子角差和机端电压差的量化过程, 考虑仿真系统中应含有至少两组同步发电机, 在每一区保留 3~4 台发电机较为合理。同时结合经济性限制, 在多机系统的所有同步发电机上加装模糊控制器是不合理的, 因此只将其加装在系统中的主要发电机(如容量较大的发电机)上, 即 38 号、39 号和 36 号节点所连发电机, 由此分为 3 个区域。

4.2 控制效果分析

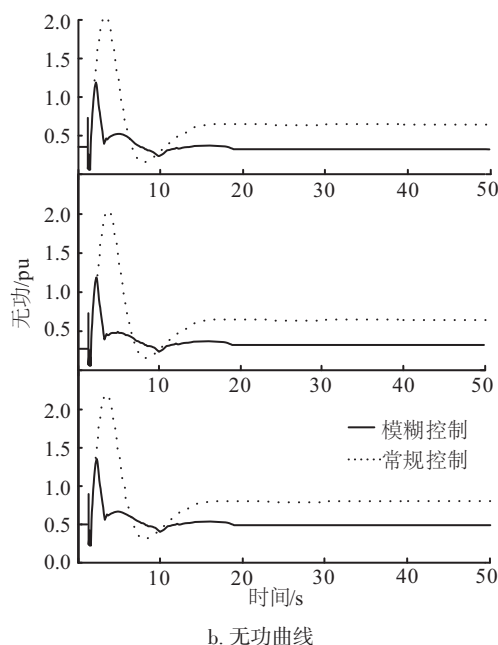
本文针对风电场群不同的渗透率水平与结网形式提出 3 种方案说明模糊控制器的有效性, 设系统在 1 s 时增加 75 MW 负荷作为扰动。在方案 1、方案 2 中, 风电场群连接在电力系统的无源节点上, 方案 3 中风电场替代一定数量的同步发电机, 上述 3 种方案渗透率依次增大, 经计算约为 10%、20%、25%。

方案 1(10%渗透率): 在方案 1 中, 风场接在 5、16 和 26 号节点, 整个系统中同步发电机的总装机容量为 840 MW, 风力机总发电量为 90 MW, 每个风场 30 MW, 风场总容量占区域电网总容量的 10%。

图 7a 为区域 1~区域 3 各风场 PCC 处的电压, 通过模糊协调控制加快了电压恢复速度, 电压波形具有较少下冲, 系统稳定性增强。故障发生后风电场群的无功损耗也有所减少, 如图 7b 所示。



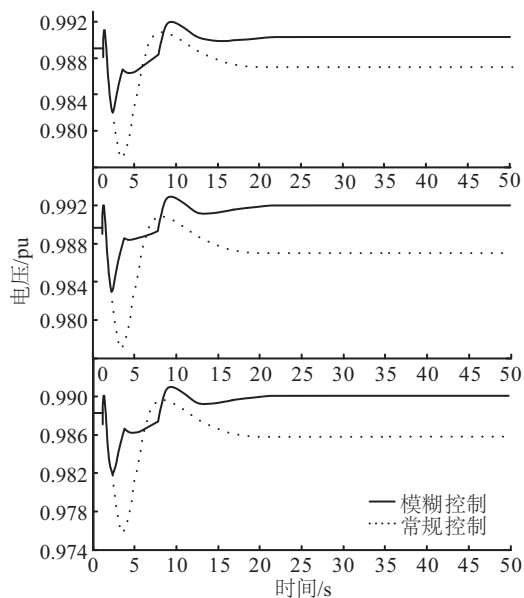
a. PCC 处电压性能



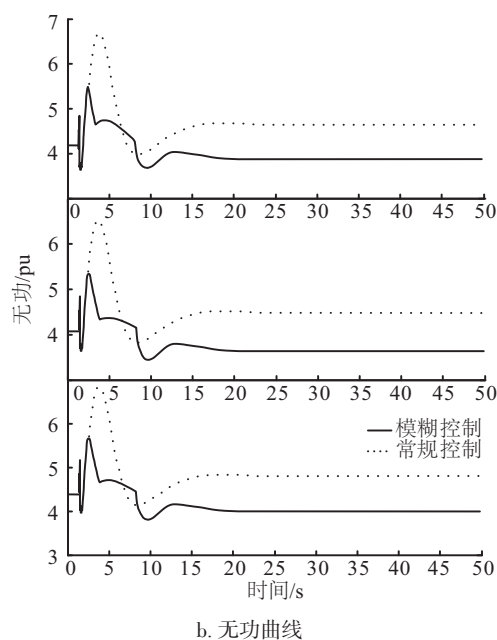
b. 无功曲线

图7 方案1的各风场PCC处电压性能和无功曲线
Fig. 7 PCC voltage performance & reactive power of each wind farm for scenario 1

方案2(20%渗透率):方案2中,风电场群的总容量占比增加至区域电网总容量的20%,每个风场提供60 MW有功输出。区域1~区域3各风场PCC处的电压变化如图8a所示。和方案一相同,模糊协调控制改善了系统受扰后PCC处的电压,电压波形具有较小下冲,系统稳定性增强且恢复速度更快。图8b为风场终端的无功功率变化,由图8b可知,模糊控制器显著增强了传统的AVR、PSS的工作性能。



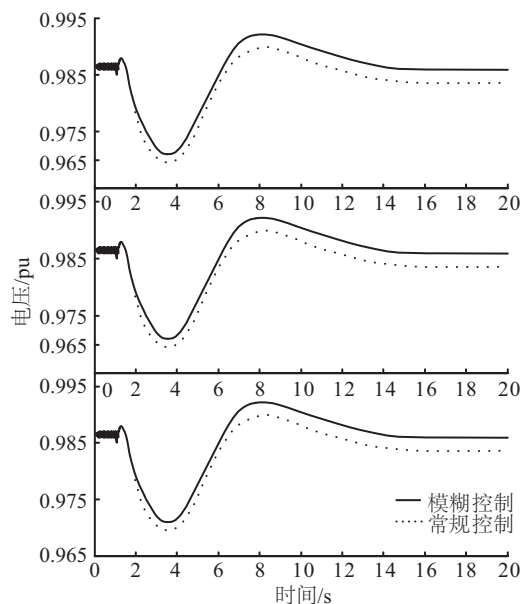
a. PCC处电压性能



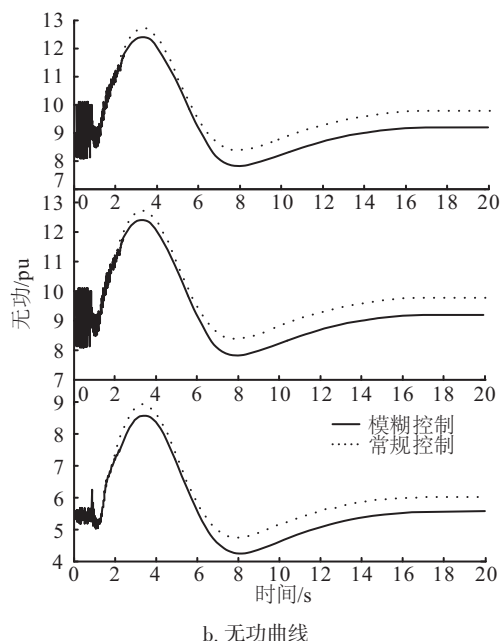
b. 无功曲线

图8 方案2的各风场PCC处电压性能和无功曲线
Fig. 8 PCC voltage performance & reactive power of each wind farm for scenario 2

方案3(25%渗透率):考虑到风场容量限制,方案3中,32、33和34号节点连接的发电机被5、16和26号节点的风场替代。3台发电机的容量分别为75、73、65 MW,共计213 MW,占区域电网总容量的25%。如图9所示,用风场代替同步发电机组后,由于系统惯性降低,因此具有更快的响应速度。区域1~区域3各风场PCC处电压如图9a所示,可见系统受扰后模糊控制器仍能保持其有效性。风场无



a. PCC处电压性能



b. 无功曲线

图9 方案3的各风场PCC处电压性能和无功曲线

Fig. 9 PCC voltage performance & reactive power of each wind farm for scenario 3

无功功率变化如图 9b 所示,可见用 DFIG 代替发电机组后,模糊控制器的无功调节性能也有所增强。

因此,在不改变隶属度函数的前提下,通过适当优化模糊规则,本文所设计的模糊控制器在上述方案中均起到增强电压稳定性的作用。

5 结 论

伴随风电在电力系统中的渗透率不断增大,系统暂态稳定性受到的影响愈加严重,若发生严重故障干扰,并网系统的稳定性会急剧恶化。本文针对 3 种不同渗透率水平及模式的风电并网系统在大干扰状态下的系统电压、无功水平进行仿真分析。仿真结果表明:在风电并网系统受扰动期间,模糊控制器可实现 AVR 和 PSS 参数的最优调节和协调动作,风场 PCC 处的电压性能有所改善,电压下冲减小,恢复速度变快,电压稳定性增强,各风场的无功损耗也有所降低,有效改善了风电并网系统的稳定性。

[参考文献]

[1] 崔 杨, 彭 龙, 仲悟之, 等. 双馈型风电场群无功分层协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35

(17): 4300—4307.

- [1] Cui Yang, Peng Long, Zhong Wuzhi, et al. Coordination strategy of reactive power control on wind farms based doubly fed induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4300—4307.
- [2] Gautam D, Vittal V, Harbour T. Impact of increased penetration of DFIG-based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 24(3): 1426—1434.
- [3] Vittal E, O'Malley M, Keane A. Rotor angle stability with high penetrations of wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 353—362.
- [4] 李基成. 现代同步发电机励磁系统设计与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [4] Li Jicheng. Design and application of modern synchronous generator system[M]. Beijing: China Electric Press, 2002.
- [5] 匡洪海, 吴政球, 李圣清, 等. 差分进化法在风电并网系统中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(2): 39—42.
- [5] Kuang Honghai, Wu Zhengqiu, Li Shengqing, et al. Application of differential evolution algorithm in wind power integrated system[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(2): 39—42.
- [6] Kundur P. Power system stability and control[M]. China Electric Power Press; McGraw-Hill Education Publishing Group, 2001: 103.
- [7] Larsen E V, Swann D A. Applying power system stabilizers part I: General concepts[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(6): 3025—3033.
- [8] 崔远海. 同步发电机自调节 AVR 控制器的研究[J]. 中国电力, 2004, 37(10): 14—17.
- [8] Cui Yuanhai. Research of self-regulating AVR regulator for synchronous generator[J]. Electric Power, 2004, 37(10): 14—17.
- [9] 揭海宝, 郭清滔, 康积涛, 等. 基于模糊自调整 PID 控制的同步发电机励磁研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 89—92.
- [9] Jie Haibao, Guo Qingtao, Kang Jitao, et al. Simulation of synchronous excitation controller based on fuzzy self-regulation PID control[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 89—92.

VOLTAGE REGULATION METHOD ON PCC OF WIND FARMS BASED ON FUZZY COORDINATION

Wang Zhenhao, Du Hongjin, Li Guoqing

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: In order to deal with voltage performance enhancement of DFIG-based wind farms integrated in large-scale power systems under voltage dips, this paper adopts the fuzzy coordination to solve the problem. Considering coordination between automatic voltage regulator (AVR) and power system stabilizer (PSS) of synchronous generators, the fuzzy coordinator is designed to eradicate destructive interactions between AVR and PSS in grid disturbance conditions. It adjusts the AVR and PSS gain to enforce them to give the best performance in fault situations. As a result, the proposed coordination supports the voltage mitigation in the point of common coupling (PCC) under voltage dips and reduces the reactive power demand of the DFIGs. The simulation results show that the fuzzy coordination between AVR and PSS can reduce the voltage dips of PCC and restore stability quickly. Moreover, it can reduce the reactive power loss of the grid, and enhance the stability of the power system.

Keywords: wind farms; fuzzy coordination; automatic voltage regulator(AVR); power system stabilizer(PSS)