

UPFC 改善含风电电力系统阻尼特性分析

和 萍, 耿斯涵, 姚依林, 曲忠杰, 李从善

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 风力发电并网容量的提高对电力系统阻尼特性的影响越来越明显, 需研究相关措施来改善风电并网后系统阻尼特性。构建了含统一潮流控制器 UPFC(Unified Power Flow Controller)的风电并网系统数学模型, 设计了 UPFC 附加功率振荡阻尼控制器, 以 IEEE 2 区域 4 机系统为例, 从特征根分析和动态时域仿真两方面系统地分析了所提 UPFC 对含风电电力系统阻尼特性的改善效果。研究表明, 所设计的 UPFC 增强了含风电电力系统的阻尼效果, 使互联系统在高联络线传输功率下仍可稳定运行。

关键词: 电力系统; 统一潮流控制器; 风电; 阻尼; 特征根分析; 附加功率振荡阻尼控制器

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.028

0 引言

常规能源枯竭及其对环境的负面影响使得清洁能源得到极大发展。在目前所有的清洁能源发电形式中, 风能以其绿色环保、可再生、蓄量丰富等特点成为最具开发潜力的清洁能源之一。随着政策导向和技术进步, 全球风电装机容量持续增长, 风电渗透率的提高使其对电力系统的影响更加明显^[1-2]。研究改善风电对电力系统小干扰稳定及阻尼振荡特性的影响, 对确保电网的稳定运行具有重要意义。

统一潮流控制器 UPFC(Unified Power Flow Controller)^[3-4]作为灵活交流输电系统 FACTS(Flexible Alternative Current Transmission Systems)家族中功能最强大的装置, 在电力系统中主要用于潮流控制和电压控制, 具有灵活可控、动态响应快的特点, 能调节系统电压、有功、无功, 改善系统的暂态稳定性, 有效抑制阻尼系统的振荡^[5-6]。UPFC 具备强大功能, 将其运用于风电并网系统中, 不仅能很好地调节系统电压, 进行无功补偿, 还能通过附加控制改善含风电系统的阻尼特性。

文献[7]依据同步发电机等面积原则和电力系统稳定控制器原理设计了 UPFC 控制系统, 其仿真结果表明 UPFC 控制系统能平滑风机转速和出力, 并且保持风机的机端电压恒定; 文献[8]表明 UPFC 在提高含风电场电力系统稳定性的同时增加了系统中的次同步阻尼, 有效减少了异步风力发电机发生次同步谐振的风险, 增加了含风电系统稳定的可靠性; 文献[9-10]构建了 UPFC 和异步风力发电机的数学模型, 通过对含有 UPFC 的风电系统进行分析, 表明 UPFC 可以对风电机组进行无功补偿, 提高风电场的

出力极限; 文献[11-13]通过分析 UPFC 并联侧和串联侧的控制方式, 表明了 UPFC 可以改变含风电的电力系统潮流分布, 从而维持电网运行的经济性和稳定性; 文献[14-15]通过仿真在系统发生故障时是否加装 UPFC, 验证了 UPFC 可以在风速突变或发生短路的情况下, 提高电力系统的动态稳定性。

可见, 针对 UPFC 对含风电电力系统稳定性影响的研究已取得了一些成果, 但现有研究多是分析 UPFC 对电压以及潮流的控制, 而对风电并网运行后电力系统阻尼变化方面缺乏分析。在此背景下, 本文构建了 UPFC 和含风电电力系统的数学模型, 从特征根分析和动态时域仿真两方面, 系统地分析了 UPFC 对含风电电力系统阻尼特性的影响。

1 UPFC 原理及模型

1.1 UPFC 的工作原理

UPFC 可视为静止同步补偿器(STATCOM)和静止同步串联补偿器(SSSC)的结合^[3-4], 两者通过直流电容连接并发生耦合。UPFC 的结构见图 1。其中, U_1 、 U_2 、 U_A 、 U_B 为节点电压; I_1 、 I_2 、 I_3 为线路电流; I_c 和 U_c 分别为并联换流器侧电流和电压; I_d 和 U_d 分别为串联换流器侧电流和电压; x_1 和 x_2 为线路等效电抗; m_1 和 δ_1 分别为换流器 VSC₁ 的幅值调节比率和相位角; m_2 和 δ_2 分别为换流器 VSC₂ 的幅值调节比率和相位角; C 为直流电容; U_{DC} 为直流电容两端电压。

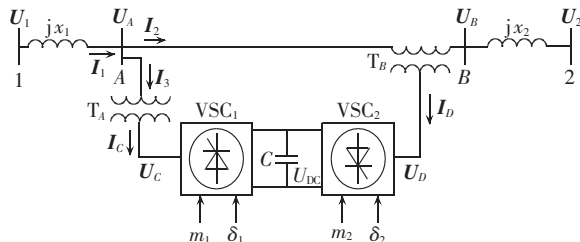


图 1 UPFC 的结构

Fig.1 Configuration of UPFC

收稿日期: 2016-09-18; 修回日期: 2017-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51507157); 河南省重大科技专项(161100211600)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51507157) and the Major Science and Technology Special Projects of Henan Province(161100211600)

并联换流器 VSC_1 通过并联变压器 T_A 并入系统,向系统连接点注入一个幅值可调的无功电流,提供或吸收与系统交换的无功功率,从而控制接入点电压 U_A 的幅值和相位,相当于一个并联电流源。串联换流器 VSC_2 通过串联变压器 T_B 串入系统,与并联侧不同的是,在串联侧是通过向接入点注入一个幅值和相位可调的电压来控制线路上的有功和无功,相当于一个串联电压源。在 UPFC 的调控中,串联电压源会与系统进行有功和无功交换,由于其自身只能产生所需的无功功率,直流电容的作用即是传递有功功率,实现有功交换的同时维持电容电压的稳定。UPFC 以其独特的结构实现了对线路上有功功率和无功功率的控制。

1.2 UPFC 的数学模型

为了分析方便,忽略变压器的电阻和暂态,UPFC 的数学模型可表示为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} U_{Ad} \\ U_{Aq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -x_A \\ x_A & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{3d} \\ i_{3q} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} m_1 U_{DC} \cos \delta_1 \\ m_1 U_{DC} \sin \delta_1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_{Bd} \\ U_{Bq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -x_B \\ x_B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} - \frac{1}{2} \begin{bmatrix} m_2 U_{DC} \cos \delta_2 \\ m_2 U_{DC} \sin \delta_2 \end{bmatrix} \\ \frac{dU_{DC}}{dt} = \frac{3m_1}{4C} [\cos \delta_1 \sin \delta_1] \begin{bmatrix} i_{3d} \\ i_{3q} \end{bmatrix} - \\ \frac{3m_2}{4C} [\cos \delta_2 \sin \delta_2] \begin{bmatrix} i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

其中, U_{Ad} 、 U_{Aq} 分别为节点电压 U_A 的 d 轴和 q 轴分量; x_A 为变压器 T_A 的电抗; i_{3d} 、 i_{3q} 分别为电流 I_3 的 d 轴和 q 轴分量; U_{Bd} 、 U_{Bq} 分别为节点电压 U_B 的 d 轴和 q 轴分量; x_B 为变压器 T_B 的电抗; i_{2d} 、 i_{2q} 分别为电流 I_2 的 d 轴和 q 轴分量。

由图 1 可得,直流电容的电场能量的变化率为:

$$CU_{DC} \frac{dU_{DC}}{dt} = \text{Re}[U_C I_C^* - U_D I_D^*] \quad (2)$$

并联侧和串联侧换流器的电流和电压满足下列方程:

$$\begin{cases} (r_C + j\omega l_C) I_C = U_A - U_C \\ (r_D + j\omega l_D) I_D = U_B - U_D \end{cases} \quad (3)$$

其中, $Z_C = r_C + j\omega l_C$ 和 $Z_D = r_D + j\omega l_D$ 分别为并联侧和串联侧的等值阻抗。

UPFC 为无源元件,在稳态时必须保持电容电压为恒定常数,即:

$$\text{Re}[U_C I_C^* - U_D I_D^*] = 0 \quad (4)$$

忽略阻抗 Z_D ,UPFC 稳态运行相量图可参考文献[15]。可知,输电线路连接了等值电压源 U_D ,节点电压 U_A 变成 U_A 和 U_D 的矢量和 U_B 。当改变 U_D 的大小和方向时,可以使 U_B 在以 U_A 为圆心的圆内运动,对输电线路的有功功率和无功功率可以直接控制。由于 I_q 对线路有并联补偿的作用,故 UPFC 可以调节 U_A 的模值。由此,UPFC 可以控制输电线路的电压、

有功和无功功率。

2 含风电的电力系统

双馈风力发电机组(DFIG)所需功率变换器的容量小、成本低,且有功和无功可解耦控制,因而已成为目前应用最广泛的机型。其定子直接与电力系统相连,而转子经 PWM 变换器与系统相连,结构图可参考文献[2]。

风机叶轮吸收风能所转化的机械功率和风速的关系如下:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p, \quad S = \pi R^2 \quad (5)$$

其中, P_m 为风轮输出的功率; C_p 为风轮的功率系数; S 为风轮扫掠面积; ρ 为空气密度; v 为风速; R 为风轮半径。

风能利用系数 C_p 计算如下:

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0.22(116/\lambda_i - 0.4\beta - 5)e^{-12.5/\lambda_i} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\lambda_i = (1/\lambda + 0.002)^{-1}$; λ 为叶尖速比,定义为 $\lambda = \omega_l R/v$, ω_l 为风轮角速度。由贝兹理论可知 C_p 最大值为 0.593。

DFIG 在 $d-q$ 坐标轴下的 4 阶数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = \left[-\frac{\omega_s}{X'_s} \left(R_s + \frac{X_s - X'_s}{\omega_s \tau_0} \right) + \omega_s i_{qs} + \frac{\omega_r}{X'_s} e'_{ds} - \right. \\ \left. \frac{1}{X'_s \tau_0} e'_{qs} + \frac{\omega_s L_m}{X'_s L_r} u_{dr} - \frac{\omega_s}{X'_s} u_{ds} \right] \omega_b \\ \frac{di_{qs}}{dt} = \left[-\omega_s i_{ds} - \frac{\omega_s}{X'_s} \left(R_s + \frac{X_s - X'_s}{\omega_s \tau_0} \right) i_{qs} + \frac{1}{X'_s \tau_0} e'_{ds} + \right. \\ \left. \frac{\omega_r}{X'_s} e'_{qs} + \frac{\omega_s L_m}{X'_s L_r} u_{qr} - \frac{\omega_s}{X'_s} u_{qs} \right] \omega_b \\ \frac{de'_{ds}}{dt} = \left[-\frac{1}{\tau_0} [e'_{ds} - (X_s - X'_s) i_{qs}] + (\omega_s - \omega_r) e'_{qs} - \right. \\ \left. \frac{\omega_s L_m}{L_r} u_{qr} \right] \omega_b \\ \frac{de'_{qs}}{dt} = \left[-\frac{1}{\tau_0} [e'_{qs} + (X_s - X'_s) i_{ds}] - (\omega_s - \omega_r) e'_{ds} + \right. \\ \left. \frac{\omega_s L_m}{L_r} u_{dr} \right] \omega_b \end{cases} \quad (7)$$

其中, i_{ds} 、 i_{qs} 、 e'_{ds} 、 e'_{qs} 分别为定子电流和转子暂态电抗后电势的 d 、 q 轴分量; τ_0 为转子时间常数; u_{ds} 、 u_{qs} 、 u_{dr} 、 u_{qr} 分别为定子和转子电压的 d 、 q 轴分量; R_s 、 X_s 、 X'_s 分别为定子电阻、定子电抗和定子暂态电抗; L_m 、 L_r 分别为定子自感和转子自感; ω_r 、 ω_b 分别为发电机轴旋转角速度和角速度基准值。其两质量模块机械传动系统和控制系统模型可参考文献[2],在此不再赘述。

3 功率振荡阻尼控制器

当系统由于负荷的波动发生低频振荡时,可能会

引起大幅度的功率振荡,从而使系统的稳定性遭到破坏。系统阻尼的大小与功率振荡的幅值相关,降低功率振荡的幅值可以增加系统阻尼,从而使系统小干扰稳定性得到加强。功率振荡阻尼(POD)控制器的加入使得系统的阻尼特性得到了优化。POD 的控制原理如图 2 所示。

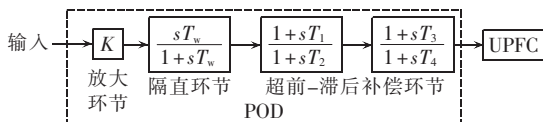


图 2 POD 控制器原理图

Fig.2 Schematic diagram of POD controller

本文 POD 参数中,放大系数 $K=-0.1$ p.u.;时间常数 $T_w=10$ s, $T_1=0.3187$ s, $T_2=0.1928$ s, $T_3=0.3187$ s, $T_4=0.1928$ s。

POD 控制器的输入信号选取尤为重要,最优的控制信号不仅可以改善 UPFC 的性能,同时还可以增强电力系统的鲁棒性。POD 控制器的输入信号可以采用本地信号,如本地线路的电流、有功功率、母线电压等;也可以采用远方信号,如远方发电机间的速度偏差、其他母线间的相位偏差以及邻近线路的有功功率等。本文考虑在 UPFC 的并联侧接入 POD 控制器,并采用互联系统联络线上的信息作为控制器的输入信号。

4 含 UPFC 的互联电力系统阻尼特性

4.1 系统模型

为系统地研究 UPFC 对含 DFIG 互联系统阻尼特性的影响,本文在 MATLAB/Simulink 下搭建如图 3 所示 IEEE 2 区域 4 机互联系统。该系统包括 2 个相似的区域系统,通过 1 条联络线连接;每个区域都有 2 台紧密耦合的机组,系统基准容量为 100 MV·A,频率为 50 Hz,具体参数见文献[2]。为便于分析,本文采用单机模型作为风电场的集总模型来代替整个风电场,通过母线 6 并入系统(如图 3 中虚框所示)。

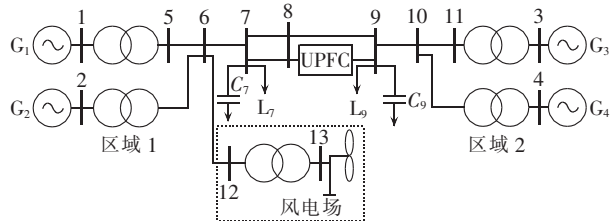


图 3 2 区域 4 机系统图

Fig.3 2-area 4-unit system

初始条件下,发电机 G_1 、 G_2 、 G_4 发出的有功功率均为 700 MW。互联系统低频振荡一般在区域弱联络线上表现得尤为突出,借助开环系统的留数指标^[16-17],考虑将 UPFC 加装在联络线中间母线 8 上,如图 3 中所示。将母线 6 上有无风电场的接入视为不同的

工况,分别考虑 UPFC 的接入与否对系统的影响。

当无风机接入时,此时区域 1、2 联络线上传输功率为 400 MW;当有风机接入时,风机出力为 30 MW,不改变原系统发电机出力,此时联络线传输功率为 429.58 MW。表 1 给出了不同工况下系统的部分特征根结果。

表 1 不同工况下的部分特征根

Table 1 Part of eigenvalues for different operating conditions

工况	无 UPFC			
	特征根	阻尼比/%	频率/Hz	相关机组
无风	$-3.0517 \pm j8.8892$	32.47	1.4958	G_3, G_4
	$-2.0215 \pm j7.5311$	25.92	1.2410	G_1, G_2
	$-0.6633 \pm j4.0174$	16.29	0.6480	G_1, G_3
有风	$-3.1005 \pm j8.8664$	33.01	1.4949	G_3, G_4
	$-2.0195 \pm j7.5357$	25.89	1.2417	G_1, G_2
	$-0.6634 \pm j4.0267$	16.26	0.6495	G_2, G_4
	$-0.6092 \pm j0.7568$	62.71	0.1546	$G_1, G_2, G_3, G_4, \text{DFIG}$
工况	有 UPFC			
	特征根	阻尼比/%	频率/Hz	相关机组
无风	$-3.0783 \pm j8.7602$	33.15	1.4778	G_3, G_4
	$-1.9481 \pm j7.4640$	25.25	1.2277	G_1, G_2
	$-0.9440 \pm j3.5065$	26.00	0.5780	G_1, G_4
有风	$-3.1448 \pm j8.7394$	33.86	1.4782	G_3, G_4
	$-1.9463 \pm j7.4695$	25.21	1.2285	G_1, G_2
	$-0.9350 \pm j3.5047$	25.78	0.5773	G_1, G_4
	$-0.6198 \pm j0.7815$	62.14	0.1588	$G_1, G_2, G_3, G_4, \text{DFIG}$

由表 1 可知,系统原有 3 个振荡模式;模式 1 和 2 分别表现为区域 1、区域 2 内发电机组的局部振荡,模式 3 表现为区域 1 和区域 2 间发电机组的区域振荡。UPFC 的接入使得模式 2 与模式 3 的阻尼比有所上升,模式 1 的阻尼比有所下降。而有风电场接入时,系统增加了 1 个与风机相关的区域间振荡模式 4。随 UPFC 的接入,模式 2、模式 3 和模式 4 的阻尼比增大,模式 1 的阻尼比减小。

4.2 POD 控制器对系统阻尼特性的影响

假设母线 7 上的负荷在 1.0~1.5 s 期间向上波动 5%,发电机 G_1 、 G_2 、 G_4 发出的有功功率均为 700 MW,风机出力 30 MW,联络线传输功率 429.58 MW。图 4 给出了母线 9 的电压曲线(标么值)和发电机 G_4 相对平衡节点的功角响应曲线。可见,当系统发生低频振荡时,未加装 POD 控制器的响应曲线振荡幅度较大,趋于稳定较为缓慢;而加装 POD 控制器的响应曲线振荡幅度较小,并在较短的时间内趋于稳定。

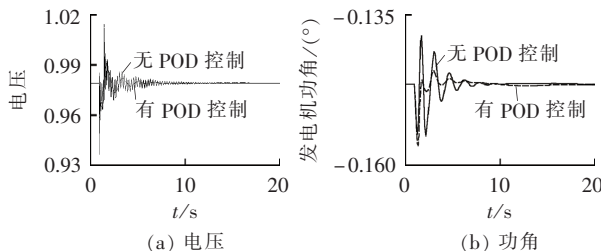


图 4 POD 控制器对系统阻尼的影响

Fig.4 Effects of POD controller on system damping

4.3 联络线传输功率对系统阻尼特性的影响

发电机出力或负荷功率变化都会使联络线传输功率发生变化。区域 1 向区域 2 送电,通过改变区域 1 中机组的出力,调整联络线的传送功率,考察此时区域间振荡模式的阻尼在有无 UPFC 时的变化规律,计算结果如表 2 所示。

表 2 不同联络线传输功率下的部分特征根
Table 2 Part of eigenvalues for different tie-line powers

联络线传输 功率/MW	有风机,无 UPFC		
	特征根	阻尼比/%	频率/Hz
429.58	$-0.6634 \pm j4.0267$	16.26	0.6495
524.14	$-0.6437 \pm j3.9933$	15.91	0.6438
618.00	$-0.6195 \pm j3.9405$	15.53	0.6349
711.06	$-0.5869 \pm j3.8652$	15.01	0.6222

联络线传输 功率/MW	有风机,有 UPFC		
	特征根	阻尼比/%	频率/Hz
429.58	$-0.9350 \pm j3.5047$	25.78	0.5773
524.14	$-0.9349 \pm j3.4748$	25.98	0.5727
618.00	$-0.9263 \pm j3.4374$	26.04	0.5666
711.06	$-0.9061 \pm j3.3942$	25.79	0.5591

可见,当无 UPFC 接入时,系统阻尼比随着联络线传输功率的增加而降低;当有 UPFC 接入时,系统阻尼比随着联络线传输功率的增加,呈现先上升后降低的趋势。对比同一联络线传输功率,有 UPFC 接入时的阻尼比相对没有 UPFC 接入时的阻尼比有所增加。阻尼比的变化过程如图 5 所示。

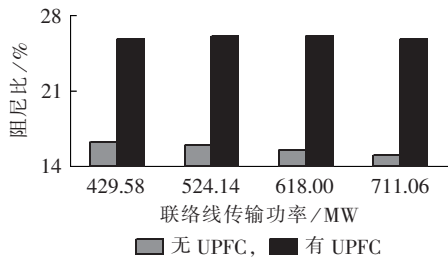


图 5 不同联络线传输功率的阻尼比柱状图
Fig.5 Histogram of damping ratio for different tie-line powers

4.4 系统鲁棒性仿真分析

采用 4.2 节中的参数,分析在不同运行方式下系统的鲁棒性能。

Case 1: 风机出力 10 MW,未加装 UPFC,区域 1 向区域 2 联络线上传输功率 410.26 MW(即为 4.1 节中的基本运行方式)。

Case 2: 风机出力 30 MW,加装 UPFC(无 POD),区域 1 向区域 2 联络线上传输功率 429.58 MW。

Case 3: 风机出力 30 MW,加装 UPFC(有 POD),区域 1 向区域 2 联络线上传输功率 429.58 MW。

Case 4: 风机出力 30 MW,加装 UPFC(有 POD),调整发电机出力,使区域 1 向区域 2 联络线上传输功率 618 MW。

假设线路 8-9 中双回线路中无 UPFC 的一回在

$t=1.0\text{ s}$ 时发生三相短路接地, $t=1.2\text{ s}$ 时此回线路被切除, $t=1.5\text{ s}$ 时故障消失,线路重新投入。仿真时间设置为 20 s ,不同工况下母线电压(标么值)、发电机相对功角曲线、发电机有功功率和 DFIG 转子电流 i_{dr} (标么值)曲线如图 6 所示。从曲线结果看,发生三相短路故障时,发电机的电磁功率发生变化,这种情

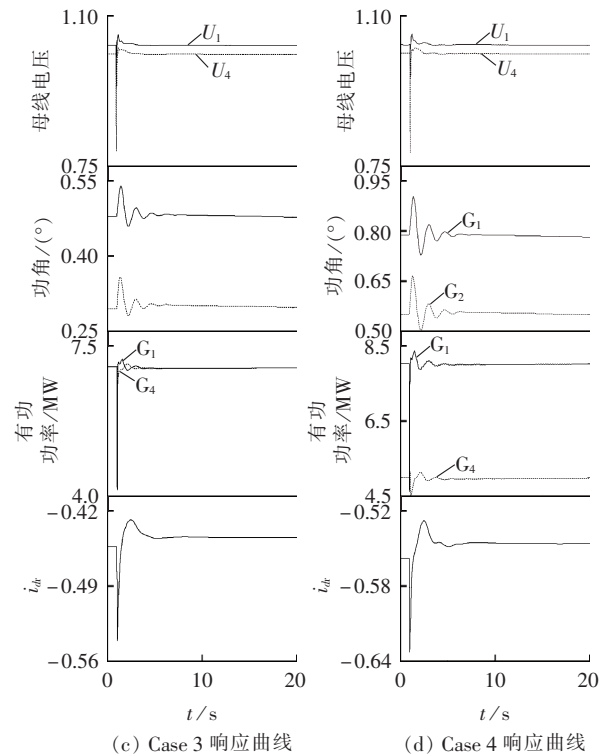
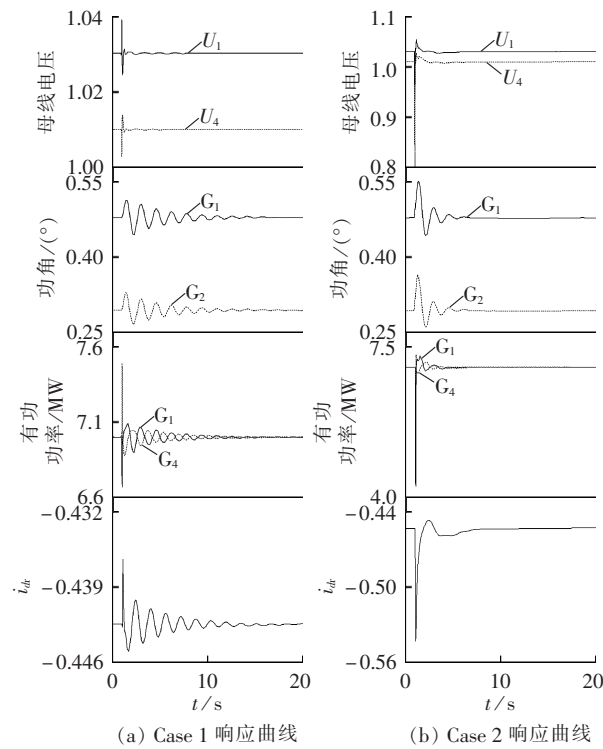


图 6 不同工况下系统响应曲线
Fig.6 System response curves of different operating conditions

况下原动机的输入功率与发电机的输出功率会产生功率不平衡,产生过剩转矩,功角发生变化,由图可知,故障发生时线路的有功功率下降,功角变大,母线电压下降,转子电流下降;在故障切除后,系统的运行特性再次发生变化,发电机转子开始制动,转子回到同步转速后,由于制动转矩仍然存在,转子角开始回摆,重复振荡,表现在线路有功功率上就是有功功率的振荡。由于系统本身存在阻尼以及 UPFC 对低频振荡的抑制作用,低频振荡会逐渐平息。对比图 6(a)—(d),加装 UPFC 后系统恢复的时间有所缩短;加装含 POD 的 UPFC 后,其响应曲线的波形没有发生大的变化,但从纵坐标的数值上看出低频振荡的幅度明显降低,缩短了系统趋于稳定的时间;增大联络线传输功率之后,系统波动增强,恢复稳定的时间加长。

5 结论

本文构建了含 UPFC 的风电场并网运行的仿真模型,从特征根和动态时域仿真两方面系统地分析了 UPFC 对含风电电力系统阻尼特性的影响。

a. 当系统发生小干扰时,UPFC 的加入增强了互联系统区域间振荡模式,提高了与风电机组相关的振荡模式阻尼。

b. POD 控制器以其降低功率振荡幅值的特点,改善了 UPFC 的控制功效。将 POD 和 UPFC 同时加装在含风电电力系统中,降低了低频振荡的幅值,缩短了系统趋于稳定的时间,提高了含风电电力系统的阻尼。

c. 伴随互联系统联络线传输功率的不断增加,不加装 UPFC 的系统阻尼逐渐减小;而加装 UPFC 的系统阻尼先增加后减小。可见,UPFC 的加入拓宽了互联系统区域间的功率传输范围,在较高联络线传输功率下提高了含风电电力系统的稳定性。

参考文献:

- [1] 康忠健,辛士郎,仲崇山,等. 双馈风电场穿透功率增加对电力系统稳定影响综述[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):94-99.
KANG Zhongjian,XIN Shilang,ZHONG Chongshan,et al. Impact of ride-through power increase of DFIG-based wind farm on power system stability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011,31(11):94-99.
- [2] 和萍,文福拴,薛禹胜,等. 风电场并网对互联系统小干扰稳定及低频振荡特性的影响[J]. 电力系统自动化,2014,38(22):1-10.
HE Ping,WEN Fushuan,XUE Yusheng,et al. Impacts of wind power integration on small signal stability and low frequency oscillation characteristics of interconnected power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(22):1-10.
- [3] 朱鑫要,金梦,李建生,等. 统一潮流控制器附加阻尼抑制次同步谐振的理论及仿真[J]. 电力系统自动化,2016,40(16):44-48,97.
ZHU Xinyao,JIN Meng,LI Jiansheng,et al. Auxiliary equipment based processing strategy for MMC-HVDC DC faults[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(16):44-48,97.
- [4] 桂帆,江道灼,吕文韬,等. 限流式统一潮流控制器参数设计及优化[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):160-164.
GUI Fan,JIANG Daozhao,LÜ Wentao,et al. Parameter design and optimization of unified power flow controller with fault current limiting[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):160-164.
- [5] GOLSHANNAVAZ S,AMINIFAR F,NAZARPOUR D. Application of UPFC to enhancing oscillatory[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014,5(4):1961-1968.
- [6] 杜文娟,王海风,JAZAERI M,等. UPFC 运行点变化对电力系统稳定和控制性能的影响[J]. 电力系统自动化,2005,29(20):44-49,66.
DU Wenjuan,WANG Haifeng,JAZAERI M,et al. Effect of variations of control operating points of UPFC on power system stability and control performance[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(20):44-49,66.
- [7] 唐爱红,卢俊,周新民,等. 基于 UPFC 的风力发电功率控制研究[J]. 武汉理工大学学报,2011,33(7):129-132,156.
TANG Aihong,LU Jun,ZHOU Xinmin,et al. Research on wind power control using UPFC[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2011,33(7):129-132,156.
- [8] 顾威,李兴源,王渝红,等. UPFC 对风电场次同步谐振的抑制作用[J]. 电力系统自动化,2010,34(8):101-105.
GU Wei,LI Xingyuan,WANG Yuhong,et al. Mitigation effects of UPFC on subsynchronous oscillations in a wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(8):101-105.
- [9] 顾威,李兴源,魏巍. UPFC 对风电场稳定性影响的仿真研究[J]. 可再生能源,2010,28(1):17-20.
GU Wei,LI Xingyuan,WEI Wei. Simulation study on wind farm stability with UPFC[J]. Renewable Energy Resources,2010,28(1):17-20.
- [10] 易成星,周前,杨伟. 统一潮流控制器在风电机组并网运行中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(20):46-51.
YI Chengxing,ZHOU Qian,YANG Wei. Implementation of UPFC on wind farm interconnected to power grid[J]. Power System Protection and Control,2014,42(20):46-51.
- [11] 张琪. 风电接入对电网低频振荡的影响及控制措施研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.
ZHANG Qi. Research on impact and control methods of low frequency oscillation in power system with wind power integration[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2012.
- [12] PATNAIK R K,ROUTRAY S K. Damping of interarea oscillations of a wind farm based multimachine power system using an unified power flow controller[C]//2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC). Bhubaneswar,India:IEEE,2015:458-464.
- [13] PAITAL S R,PATRA S,SINGH A K,et al. Reactive power compensation using PSO controlled UPFC in a microgrid with a DFIG based WECS[C]//2015 Annual IEEE India Conference (INDICON). New Delhi,India:IEEE,2015:1-5.
- [14] 肖本旺,王渝红,李兴源,等. 基于 UPFC 的双馈风电场动态稳定性改善仿真[J]. 电测与仪表,2015,52(23):6-10.
XIAO Benwang,WANG Yuhong,LI Xingyuan,et al. Improved dynamic stability performance of DFIG-based wind farm by UPFC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2015,52

(23):6-10.

[15] 饶成诚,王海云,唐新安. 基于统一潮流控制器的并网风电场潮流分析[J]. 电气自动化,2013,35(3):74-76.

RAO Chengcheng,WANG Haiyun,TANG Xinan. Power flow analysis of wind farm in power grid based on UPFC[J]. Power System & Automation,2013,35(3):74-76.

[16] 钟志勇,谢志棠,王克文. 适用于电力系统动态稳定分析的元件建模新方法[J]. 中国电机工程学报,2000,20(3):30-33.

ZHONG Zhiyong,XIE Zhitang,WANG Kewen. A novel modeling technique for modern power system dynamic studies[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(3):30-33.

[17] 钟志勇,王克文,谢志棠. 用特征根灵敏度分析进行静态无功补偿器的设计[J]. 电力系统自动化,1999,23(14):9-14.

ZHONG Zhiyong,WANG Kewen,XIE Zhitang. Static var com-

pensator design based on eigenvalue sensitivity analysis [J]. Automation of Electric Power Systems,1999,23(14):9-14.

作者简介:



和 萍

和 萍(1980—),女,河南鄢陵人,副教授,博士,主要从事电力系统稳定性分析控制、风电并网等方面的研究(E-mail:hplkz@126.com);

耿斯涵(1992—),男,河南许昌人,硕士研究生,主要从事电力系统稳定性分析控制、FACTS 装置方面的研究;

姚依林(1994—),男,河南汝南人,硕士研究生,主要从事风光互补发电方面的研究。

Analysis of damping characteristics improvement by UPFC
for power system with wind farms

HE Ping,GENG Sihan,YAO Yilin,QU Zhongjie,LI Congshan
(Zhengzhou University of Light Industry,Zhengzhou 450002,China)

Abstract: Along with the increasing grid-connecting capacity of wind power,its impact on the damping characteristics of power system becomes more and more apparent. Relative measures should be studied to improve the damping characteristics of power system due to the wind power integration. A mathematic model of wind power integration system including UPFC(Unified Power Flow Controller) is built and an auxiliary power oscillation damping controller of UPFC is designed. With IEEE 2-area 4-unit system as example,the eigenvalue analysis and dynamic time-domain simulation are applied to study the improvement effect of UPFC on the damping characteristics of power system with wind farms. Results show that,the designed UPFC enhances the damping effect of power system with wind farms and maintains the stable operation of interconnected power system with higher tie-line power.

Key words: electric power systems; UPFC; wind power; damping; eigenvalue analysis; auxiliary power oscillation damping controller