

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190648

## FACTS 装置对含风电互联系统低频振荡特性分析

和萍, 陈婕, 耿斯涵, 申润杰, 祁盼

(郑州轻工业大学电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 随着电力系统互联加强, 风电并网容量的增加对电网的稳定运行影响越来越大。构建了以 UPFC(Unified Power Flow Controller, UPFC)和 SVC(Static Var Compensator, SVC)为代表的 FACTS 装置与含风电系统的数学模型。采用留数指标定位 FACTS 装置, 设计了附加阻尼控制器(Additional Damping Controller, ADC)。基于 IEEE 2 区域 4 机互联系统, 从特征根分析和时域仿真两个方面分析了 FACTS 装置对含风电互联系统低频振荡特性的影响。研究表明, 加装附加阻尼控制器的 FACTS 装置能够维持母线电压以及发电机转速的稳定, 增加互联系统联络线功率传输范围, 抑制低频振荡引起的电网参数波动, 改善了含风电电力系统的低频振荡特性。

**关键词:** 风电并网; 互联系统; FACTS; ADC; 低频振荡

### Analysis of FACTS device on low-frequency oscillation characteristics of a power system with wind farm integration

HE Ping, CHEN Jie, GENG Sihan, SHEN Runjie, QI Pan

(School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** With the increasing scale of power system interconnection, the increase of wind power grid capacity has more and more influence on the stable operation of a power system. The wind power mathematical model of a FACTS device represented by UPFC and SVC are constructed. The FACTS device is positioned by residue index, and an additional damping controller is designed. Then, the effect of the FACTS device on the low-frequency oscillation of the wind power system is analyzed based on the IEEE 2-area 4-unit system by employing eigenvalue analysis and dynamic time-domain simulations. Simulation results show that system's bus voltage and the stability of the generator speed can be maintained using the FACTS device with ADC. On the other hand, the range of the tie-line power of the interconnected system is increased, the fluctuation of power network parameters caused by low frequency oscillation is suppressed, and the low-frequency oscillation characteristic of the wind power system is improved.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507157 and No. 51607158), Henan Science and Technology Research Project (No. 202102210305), and Project Foundation for Young Key Teachers of Henan Colleges and Universities (No. 2017GGJS093).

**Key words:** wind power integration; interconnected system; FACTS; ADC; low-frequency oscillation

## 0 引言

伴随我国现代工业的高速发展, 带来的是煤、石油等化石能源的过度消耗以及严重的环境污染问题<sup>[1]</sup>。风能作为一种绿色无污染的清洁能源, 不仅优化了能源结构, 对生态环境的改善也起到了重要

的作用。大力发展风电是实现我国能源可持续发展的重要措施。现今风能在电网中的渗透率越来越高<sup>[2]</sup>, 但风能具有随机性与波动性, 其大规模并网改变了原电力系统的潮流分布、线路传输功率与整个系统的惯量, 对电网的稳定性造成了较大的影响<sup>[3-4]</sup>。

柔性交流输电系统(Flexible Alternative Current Transmission Systems, FACTS)<sup>[5-6]</sup>以其动态原件之间的交互作用对电网的低频振荡和稳定性问题起到了积极的作用。作为 FACTS 装置中的重要成员, 统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller,

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51507157, 51607158); 河南省科技攻关项目资助(202102210305); 河南省高等学校青年骨干教师项目资助(2017GGJS093)

UPFC)和静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)更是广泛地应用在电力系统中,为电网的稳定运行提供了保障。在风电渗透率比较高的电力系统中,UPFC 可以对风电场提供无功补偿,减少其从系统中吸收的无功功率,从而对电压进行有效控制,提高系统的暂态稳定性<sup>[7-9]</sup>;SVC 可以快速平滑地调节无功功率的大小,维持风电场接入点电压的稳定,降低了风速波动对电力系统的影响<sup>[10-11]</sup>。

文献[12]建立了含 UPFC 的风电场两阶段 OPF 模型,通过对 UPFC 的参数优化控制,快速有效地调控潮流分布,提高了系统的安全性与稳定性;文献[13]建立基于频率反馈的大规模柔性负荷控制策略,并针对 UPFC 串联侧设计基于功率反馈的附加控制策略。文献[14]研究表明 UPFC 在故障发生期间可以提高异步风力发电机的机端电压,并能快速进行动态无功补偿,增强风电场的故障穿越能力,维持系统的稳定运行。文献[15-16]通过 UPFC 串联侧的预测控制策略研究,降低了控制器复杂性,抑制了风电机组向电网注入的谐波分量,进而改善了系统电能质量和动态稳定性。文献[17]提出了一种适用于多个控制策略间平滑切换的触发控制逻辑,结合各控制策略的“软切换”逻辑,实现了 UPFC 多个控制策略间的平滑切换,确保输电系统的稳定运行。文献[18]研究了输电系统复杂变化对 SVC 电压调节器的影响,分析和总结了适用于输电系统 SVC 电压调节器增益控制的方法,提出一种基于闭环积分控制的增益自适应控制方法。文献[19]综述了含 SVC 的大规模风电并网的无功电压控制现状,比较了恒无功和恒电压控制方式,表明采用恒电压控制的 SVC 提高了电力系统的小干扰稳定性。文献[20]在 RTDS 平台上搭建了含 SVC 的双馈风电机组模型,研究了 SVC 对双馈风电机组机端电压和短路电流特性的影响,研究表明 SVC 在故障发生时提高风电机组电压,增大了流向系统的短路电流,增强了过电流保护动作的灵敏度,增加了系统运行的可靠性;基于 SVC 的控制参数和触发延迟时间对“错位补偿”效应的影响,文献[21]提出了 SVC 变参数控制策略,降低了风机高电压运行下脱网的概率。

综上所述,关于 FACTS 装置对含风电电力系统的影响,国内外的学者已经进行了大量的研究。但现有的研究成果多是考虑 FACTS 装置的运行参数和控制方式对电力系统电压稳定性及风电场故障穿越能力的影响,针对 FACTS 装置联合对含风电电力系统低频振荡特性影响的研究鲜见报道。在此基础上,本文构建了 UPFC、SVC 及含风电互联系统的数学模型,采用留数指标定位 FACTS 装置,

并设计了附加阻尼控制器,在一 2 区域互联系统上,采用特征值和时域仿真方法,系统分析了所提方法对改善含风电电力系统阻尼特性的效果,对提高含风电互联系统小干扰稳定性提供了新思路。

## 1 UPFC 与 SVC 模型

### 1.1 UPFC 工作原理及数学模型

如图 1 所示,UPFC 的基本结构包括两个换流器 VSC1 与 VSC2,二者通过直流电容相连并发生耦合<sup>[11]</sup>。换流器 VSC1 经由并联变压器接入电网,向接入点输入一个幅值灵活可调的无功电流,通过控制与电网的无功交换来调解电压的相位与幅值,相当于一个并联电流源。换流器 VSC2 经由串联变压器 T<sub>se</sub> 与电网相连,向电网输入一个可以分别调节幅值与相位的电压来控制线路上的潮流分布,相当于一个串联电压源。直流电容 C 为串联换流器所需有功功率的传输桥梁,起到维持 UPFC 内部有功平衡的作用。

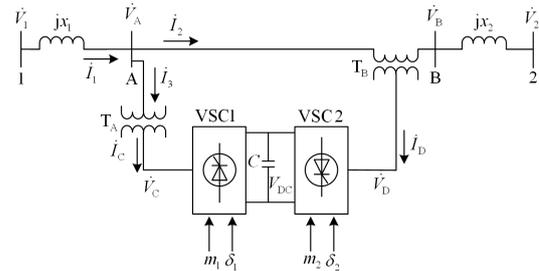


图 1 UPFC 的工作原理图

Fig. 1 Principle diagram of UPFC

图中:  $\dot{V}_1$ 、 $\dot{V}_2$ 、 $\dot{V}_A$ 、 $\dot{V}_B$ 、 $\dot{V}_C$  为节点电压;  $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 、 $\dot{I}_3$ 、 $\dot{I}_C$ 、 $\dot{I}_D$  为线路电流;  $x_1$  和  $x_2$  分别为线路等效电抗;  $m_1$  和  $\delta_1$  分别为换流器 VSC1 的幅值调节比率和相位角;  $m_2$  和  $\delta_2$  分别为换流器 VSC2 的幅值调节比率和相位角;  $C$  为直流电容;  $V_{DC}$  为直流电容两端的电压。

忽略变压器的电阻和暂态行为,UPFC 的数学模型可表示为

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

式中： $V_{Ad}$ 、 $V_{Aq}$ 分别为节点电压 $V_A$ 的 $d$ 轴和 $q$ 轴分量； $x_A$ 为变压器A的电抗； $i_{3d}$ 、 $i_{3q}$ 分别为电流 $I_3$ 的 $d$ 轴和 $q$ 轴分量； $V_{Bd}$ 、 $V_{Bq}$ 分别为节点电压 $V_B$ 的 $d$ 轴和 $q$ 轴分量； $x_B$ 为变压器B的电抗； $i_{2d}$ 、 $i_{2q}$ 分别为电流 $I_2$ 的 $d$ 轴和 $q$ 轴分量。

### 1.2 SVC 工作原理及数学模型

静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)是由晶闸管控制的电抗器(Thyristor Controlled Shunt Reactor, TCR)和电容器(Thyristor Switched Shunt Capacitors, TSC)组成,其内部结构图如图2所示<sup>[19]</sup>。为了克服SVC在正常工作时产生的谐波电流,SVC中设有滤波器。

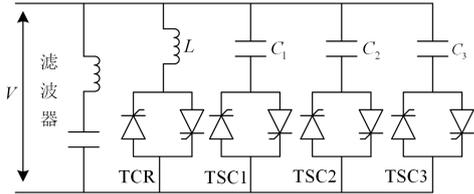


图2 SVC内部结构图

Fig. 2 Structure diagram of SVC

SVC可被等值为一个可调电纳,如图3所示。通过改变输电电纳 $b$ 的大小来控制电力系统的转移电抗,从而起到调节系统电压、增强系统的静态和暂态稳定性的作用。当电力系统稳定运行时,SVC可以提供阻尼力矩以抑制系统的功率振荡,改善系统的阻尼特性。

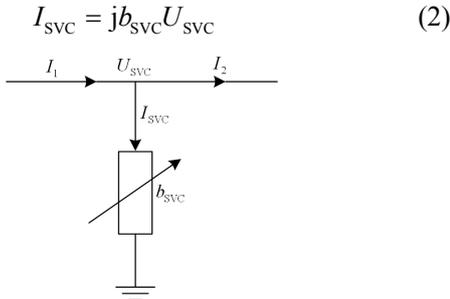


图3 SVC的等值电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of SVC

SVC的控制框图如图4所示。其中, $K_1$ 为控制器增益, $U_{ref}$ 为被控节点参考电压, $\alpha_0$ 为稳态时晶闸管的触发角, $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 为时间常数, $\alpha_{max}$ 、 $\alpha_{min}$ 分别为触发角的最大值和最小值。

## 2 FACTS 装置定位与功率振荡阻尼控制器

### 2.1 采用留数指标定位 FACTS 装置

如图5所示的区域互联系统发生振荡时,相对

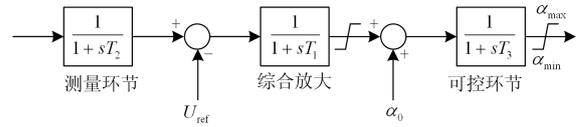


图4 SVC的控制框图

Fig. 4 Control block of SVC

全系统统一惯性中心而言,一般振荡表现为加速机群和减速机群发电机之间的相对摇摆;2台等值发电机的转速增量( $\Delta\omega_1$ 和 $\Delta\omega_2$ )和功角增量( $\Delta\delta_1$ 和 $\Delta\delta_2$ )具有同频反相正弦振荡的特点。区域之间通过联络线的振荡模式。当使用FACTS来增强系统的振荡阻尼时,联络线信息应是理想的控制输入信号。

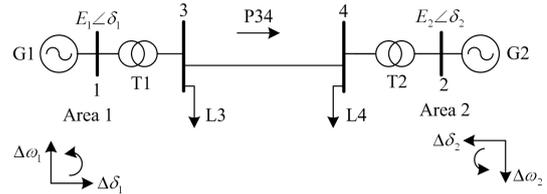


图5 2机互联电力系统

Fig. 5 A two-generator interconnected power system

针对图1的系统状态方程为

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BZ \\ Y = CX \end{cases} \quad (3)$$

针对某一个模式 $k$ ,留数矩阵可以表示为

$$R_k = CU_k W_k^T B \quad (4)$$

式中: $W_k$ 和 $U_k$ 分别为第 $k$ 个特征值 $\lambda_k$ 的左、右特征向量,且已标准化,即 $W_k^T U_k = 1$ 。

假设控制器传输矩阵为 $F(s, q)$ ,有 $Z = F(s, q)Y$ ,则状态矩阵 $A_c = A + BF(s, q)C$ 、第 $k$ 个特征值 $\lambda_k = \alpha_k \pm j\beta_k$ 对闭环系统参数灵敏度可表达为

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial q} = W_k^T \frac{\partial A_c}{\partial q} U_k = W_k^T \frac{\partial F(\lambda_k, q)}{\partial q} C U_k \quad (5)$$

比较式(4)和式(5),可得

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial q} = \text{trace} \left[ R_k \frac{\partial F(\lambda_k, q)}{\partial q} \right] \quad (6)$$

式中, $\text{trace}[\cdot]$ 表示方阵对角线元素之和,即方阵的迹。

对于单变量静态反馈系统,其灵敏度等于留数。因此,若 $q$ 代表FACTS附加阻尼控制器增益,开环系统的留数也可通过其闭环系统的特征值灵敏度 $\partial \lambda_k / \partial q|_{q=0}$ 求得,式(6)可表征系统状态变量对关键特征根的灵敏度。为增加系统阻尼,需要如图6中所示的附加阻尼控制器。尽管此时尚未确定阻尼信号,仍可借助开环系统的留数指标对FACTS进行

选址及控制信号选取<sup>[22-23]</sup>。

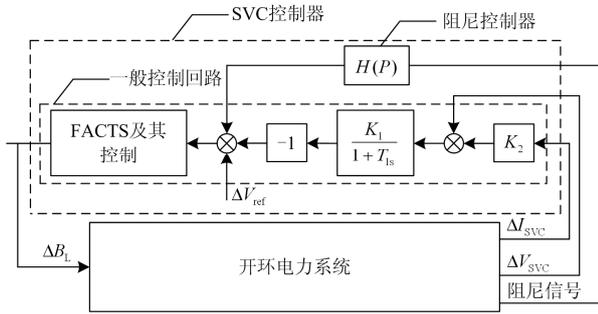


图 6 FACTS 装置及开环电力系统控制框图

Fig. 6 Control block of FACTS device and open loop power system

## 2.2 附加阻尼控制器

在含风电电力系统中, UPFC和SVC都可以作为无功补偿装置, 从而提高系统运行的稳定性, 但有时也可能起到相反的作用。附加阻尼控制器(Additional Damping Controller, ADC)与无功补偿装置协调运行能够有效改善系统阻尼特性, 提高系统的阻尼比, 增强系统的小干扰稳定性, 消除UPFC与SVC带来的不利影响。本文参考传统电力系统稳定器结构设计, 采用如图 7 所示的ADC控制框图, 包括放大、隔直、相位补偿、限幅等几个主要环节。

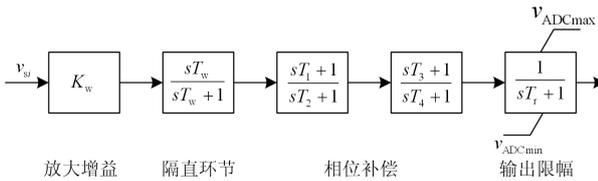


图 7 ADC 控制框图

Fig. 7 Control block of ADC

其传递函数可表示为

$$G(s) = K_w \frac{sT_w}{sT_w+1} \frac{sT_1+1}{sT_2+1} \frac{sT_3+1}{sT_4+1} \frac{1}{sT_r+1} \quad (7)$$

其中:  $v_{si}$  为输入信号;  $v_{ADC}$  为 ADC 控制器输出信号;  $K_w$  为控制器增益;  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  为超前-滞后时间常数;  $T_w$  为隔直环节的时间常数;  $T_r$  为限幅环节的时间常数。本文 ADC 参数取  $T_w=10$  p.u.,  $T_1=10$  p.u.,  $T_1=0.3187$  s,  $T_2=0.1928$  s,  $T_3=0.3187$  s,  $T_4=0.1928$  s。增益决定 ADC 控制器提供的阻尼, 相位补偿模块是为输入信号提供合适的超前或滞后补偿。

## 3 风电机组模型

基于双馈风力发电机组(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)可以实现有功、无功的解耦控制, 并且其定子和网侧变换器都具有一定的无功调节功

能, 已成为兆瓦级风机中的主流机型, 结构图如图 8 所示。

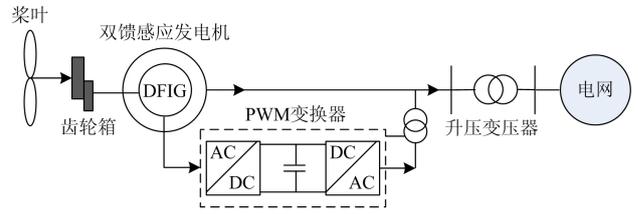


图 8 双馈感应风力发电机

Fig. 8 Principle diagram of DFIG

### 3.1 传动系统模型

对于传动装置, 一般采用两质量模块模型描述, 其轴系模型可表示为<sup>[19]</sup>

$$\begin{cases} \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H_g}(T_{sh} - T_e - D_t\omega_r) \\ \frac{d\theta_t}{dt} = \omega_b(\omega_t - \omega_r) \\ \frac{d\omega_t}{dt} = \frac{1}{2H_t}(T_m - T_{sh}) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $H_t$ 和 $H_g$ 分别为风力机和发电机的惯性时间常数;  $\omega_t$ 和 $\omega_r$ 分别为风力机转速和发电机转速(标么值);  $\theta_t$ 为轴系扭曲角度;  $D_t$ 为风力机的阻尼系数;  $\omega_b$ 为定子磁场转速, 即系统同步转速(标么值取1.0);  $T_m$ 、 $T_{sh}$ 和 $T_e$ 分别为风力机输出机械转矩、轴系转矩和发电机转子电磁转矩, 其表达式分别为

$$\begin{cases} T_m = P_m/\omega_t = 0.5\rho\pi R^2 C_p V_m^3/\omega_t \\ T_{sh} = K_{sh}\theta_t + D_{sh}\omega_b(\omega_t - \omega_r) \\ T_e = L_m(i_{ds}i_{qr} - i_{qs}i_{dr}) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $P_m$ 为风力机的输出电磁功率;  $C_p$ 为风力机的风能利用系数(其为风力机的叶尖速比 $\lambda$ 和桨距角 $\beta$ 的非线性函数);  $\rho$ 为空气密度;  $R$ 为风轮机叶片半径;  $V_m$ 为风速;  $K_{sh}$ 和 $D_{sh}$ 分别为低速轴到高速轴的刚度系数和阻尼系数;  $L_m$ 为定转子互感;  $i_{ds}$ 和 $i_{qs}$ 分别为定子电流的 $d$ 、 $q$ 轴分量;  $i_{dr}$ 和 $i_{qr}$ 分别为转子电流的 $d$ 、 $q$ 轴分量。

可采用式(10)计算风能利用系数 $C_p$ 。

$$\begin{cases} C_p = 0.22(116/\lambda - 0.4\beta - 5)e^{-12.5/\lambda} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\lambda_i=1/(1/\lambda+0.002)$ ;  $\lambda$ 为叶尖速比, 定义为 $\lambda=\omega_r R/V_m$ 。由贝兹理论可知 $C_p$ 最大值为0.593。

### 3.2 DFIG 模型

忽略定子暂态过程, 假设 $d$ 、 $q$ 轴参数对称, 消

去转子电流,DFIG 采用绕线式异步电机在  $d-q$  坐标系下的 4 阶模型<sup>[24-26]</sup>为

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}'}{dt} = [-\frac{\omega_s}{X_s'}(R_s + \frac{X_s - X_s'}{\omega_s T_0}) + \omega_s i_{qs}' + \frac{\omega_r}{X_s'} e_{ds}' - \frac{1}{X_s' T_0} e_{qs}' + \frac{\omega_s L_m}{X_s' L_r} u_{dt} - \frac{\omega_s}{X_s'} u_{ds}] \omega_b \\ \frac{di_{qs}'}{dt} = [-\omega_s i_{ds}' - \frac{\omega_s}{X_s'}(R_s + \frac{X_s - X_s'}{\omega_s T_0}) i_{qs}' + \frac{1}{X_s' T_0} e_{ds}' + \frac{\omega_r}{X_s'} e_{qs}' + \frac{\omega_s L_m}{X_s' L_r} u_{qt} - \frac{\omega_s}{X_s'} u_{qs}] \omega_b \\ \frac{de_{ds}'}{dt} = \{-\frac{1}{T_0} [e_{ds}' - (X_s - X_s') i_{qs}'] + (\omega_s - \omega_r) e_{qs}' - \frac{\omega_s L_m}{L_r} u_{qt}\} \omega_b \\ \frac{de_{qs}'}{dt} = \{-\frac{1}{T_0} [e_{qs}' + (X_s - X_s') i_{ds}'] - (\omega_s - \omega_r) e_{ds}' + \frac{\omega_s L_m}{L_r} u_{dt}\} \omega_b \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $i_{ds}'$ 、 $i_{qs}'$ 、 $e_{ds}'$ 、 $e_{qs}'$  分别为定子电流和转子暂态电抗后电势的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $T_0$  为转子时间常数;  $u_{ds}$ 、 $u_{qs}$ 、 $u_{dt}$ 、 $u_{qt}$  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;  $\omega_r$ 、 $\omega_b$  分别为发电机轴旋转角速度和角速度基准值。

### 3.3 桨距角控制系统模型

风力机运行点随风速变化而变化。为提高风能转换效率,并且使风力机输出平稳,需要对风力机的桨距角进行控制。桨距角的控制模型一般可描述为

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{T_\beta} (\beta_{ref} - \beta) \quad (12)$$

式中:  $\beta$  为桨距角;  $\beta_{ref}$  为桨距角参考值;  $T_\beta$  为桨距控制系统的惯性时间常数。

### 3.4 变流器模型

机侧变流器为 DFIG 提供励磁电压,在定子磁链定向矢量控制策略<sup>[18]</sup>下实现有功功率和无功功率的解耦调节,捕获最大风能和保持设定的功率因数;网侧变流器与电力系统直接相连,在电压定向矢量控制下维持电容电压恒定。两个变流器的直流侧由共同的电容器 DC 提供电压支撑。变流器的功率方程可表示为

$$\begin{cases} P_r = P_g + P_{DC} \\ P_r = v_{dt} i_{dt} + v_{qt} i_{qt} \\ P_g = v_{dg} i_{dg} + v_{qg} i_{qg} \\ P_{DC} = v_{DC} i_{DC} = -C v_{DC} dv_{DC}/dt \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $P_r$  为机侧变流器 AC 终端的有功功率;  $P_g$  为网侧变流器 AC 终端的有功功率;  $P_{DC}$  为 DC 联络线有功功率;  $i_{dt}$  和  $i_{qt}$  分别为转子电流的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $i_{dg}$  和  $i_{qg}$  分别为网侧变流器电流的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $v_{dg}$  和  $v_{qg}$  分别为网侧变流器电压的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $i_{DC}$  和  $v_{DC}$  分别为电容器 DC 的电流和电压;  $C$  为电容器的电容。由式(13)可得

$$C v_{DC} \frac{dv_{DC}}{dt} = v_{dg} i_{dg} + v_{qg} i_{qg} - (v_{dt} i_{dt} + v_{qt} i_{qt}) \quad (14)$$

## 4 UPFC 与 SVC 的交互影响研究

### 4.1 系统模型

为研究 UPFC 与 SVC 对含风电互联系统低频振荡特性的影响,本文以 IEEE 4 机 2 区域互联系统为例,在 Matlab/Simulink 下搭建系统模型如图 9 所示。该系统有 4 台发电机对称地分布在两个相似的发电区域,两区域间的功率传输通过一条双回联络线实现:借助 2.1 节所介绍的开环系统的留数指标<sup>[22-23]</sup>,UPFC 接在母线 8-9 的其中一回线路上;SVC 连接在母线 8 上。DFIG 并网点选择区域 1 母线 6;系统频率为 50 Hz,基准容量为 100 MW,详细参数见文献[1]。为方便分析,本文用 1 台 DFIG 风力发电机集总参数表示整个风电场,如图 9 中方框所示。

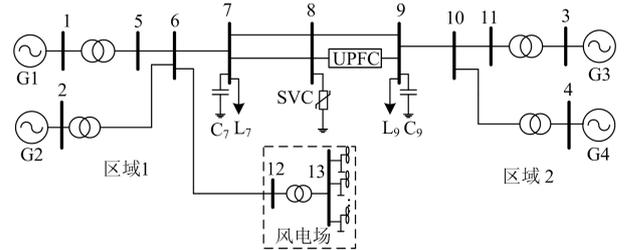


图 9 4 机 2 区域系统图

Fig. 9 4-generator 2-area system

### 4.2 UPFC 与 SVC 对电力系统阻尼特性的影响

初始条件下,4 台发电机 G1、G2、G3、G4 发出的有功功率均为 700 MW,风速设置为 10 m/s,保持联络线传输功率一致。为验证 UPFC 与 SVC 对电力系统阻尼特性的影响,分为四种不同的工况,分析风机出力 0 MW、10 MW、30 MW、70 MW 的情况下系统部分特征根的变化,结果如表 1 所示。

电力系统低频振荡一般有两种振荡模式:模式 1,区域内局部振荡模式;模式 2,区域间振荡模式。已有研究<sup>[25]</sup>表明 DFIG 接入系统时,会影响系统振荡模式的变化,主要表现在新增机电模式方面。表 1 给出了在不同发电机出力下的区域间振荡模式。由结果可知,未加装 FACTS 装置前系统固有阻尼较低,随着风机出力的增加,模式 1 的阻尼比上升,

而模式 2 的阻尼比有所下降; 而单独加装 UPFC 或 SVC 时, 系统模式 1 与模式 2 的阻尼变化趋势与原系统保持一致, 但其阻尼比的数值大幅上涨; 同时加装

UPFC 与 SVC 时, 由于控制器之间的相互耦合作用, 与单独加装其中一个相比, 区域间阻尼比略有下降, 但与无加装时相比较, 阻尼比提升效果较明显。

表 1 不同工况下的部分特征根

Table 1 Part of eigenvalues for different operating conditions

风机出力/MW	振荡模式	无 UPFC, 无 SVC			有 UPFC, 无 SVC			相关机组
		特征根	频率/Hz	阻尼比/%	特征根	频率/Hz	阻尼比/%	
0	区域模式	-0.2548±j4.0338	0.643 3	6.30	-0.8370±j3.9499	0.642 6	20.73	G1,G3
10	区域模式 1	-0.2601±j4.0480	0.645 6	6.41	-0.8415±j3.9686	0.645 7	20.74	G1,G3
	区域模式 2	-0.3589±j0.7600	0.133 8	42.70	-0.6535±j0.6873	0.150 9	68.91	G1,G2,G3,G4,DFIG
30	区域模式 1	-0.2655±j4.0473	0.645 5	6.55	-0.8451±j3.9677	0.645 6	20.83	G1,G3
	区域模式 2	-0.3549±j0.7889	0.137 7	41.03	-0.6496±j0.7137	0.153 6	67.31	G1,G2,G3,G4,DFIG
70	区域模式 1	-0.2774±j4.0475	0.645 7	6.84	-0.8528±j3.9671	0.645 8	21.02	G1,G3
	区域模式 2	-0.3489±j0.8750	0.149 9	37.04	-0.6356±j0.7975	0.162 3	62.33	G1,G2,G3,G4,DFIG
风机出力/MW	振荡模式	无 UPFC, 有 SVC			有 UPFC, 有 SVC			相关机组
		特征根	频率/Hz	阻尼比/%	特征根	频率/Hz	阻尼比/%	
0	区域模式	-0.8174±j3.8713	0.629 7	20.66	-0.8372±j3.9812	0.647 5	20.58	G1,G3
10	区域模式 1	-0.8215±j3.8920	0.633 1	20.65	-0.8422±j3.9989	0.650 4	20.61	G1,G3
	区域模式 2	-0.7075±j0.6684	0.154 9	72.69	-0.6304±j0.6929	0.149 1	67.30	G1,G2,G3,G4,DFIG
30	区域模式 1	-0.8247±j3.8923	0.633 2	20.73	-0.8459±j3.9974	0.650 3	20.70	G1,G3
	区域模式 2	-0.7038±j0.7013	0.158 1	70.84	-0.6261±j0.7150	0.151 2	65.88	G1,G2,G3,G4,DFIG
70	区域模式 1	-0.8317±j3.8944	0.633 8	20.89	-0.8538±j3.9957	0.650 3	20.90	G1,G3
	区域模式 2	-0.6867±j0.7952	0.167 2	65.36	-0.6135±j0.7923	0.159 5	61.22	G1,G2,G3,G4,DFIG

## 5 含风电电力系统的稳定性分析

为充分验证加装附加阻尼控制器的 FACTS 装置对含风电电力系统阻尼特性的影响, 基于下列 4 种不同的工况(如表 2 所示)对系统进行鲁棒性分析。

表 2 不同工况划分

Table 2 Division of different working conditions

工况	UPFC	SVC	ADC
Case1	×	×	无
Case 2	✓	×	$K_{rUPFC}=0.1$
Case 3	×	✓	$K_{rSVC}=0.3$
Case 4	✓	✓	$K_{rUPFC}=0.1, K_{rSVC}=0.3$

调整发电机 G1、G2 与 G3 的出力, 使联络线上的传输功率为 468.16 MW、562.52 MW、656.18 MW、748.94 MW, 得到部分特征根如表 3 所示。由仿真结果可知, 未加装 FACTS 装置时, 系统的初始阻尼数值较低且随着联络线传输功率的增加而降低; 在加装 UPFC 或 SVC 时, 系统的初始阻尼大幅增加, 并且与联络线传输功率的增长趋势保持一致; 同时加装 UPFC 和 SVC 时, 系统保持与加装单一 FACTS 装置同样的增长趋势, 但由于控制器之间的相互影响, 系统阻尼略有减小。设定互联系统双回联络线 8-9 中一回在  $t=1.0$  s 时发生三相短路接地,  $t=1.1$  s 时线路继电保护启动, 此回线路被切除,

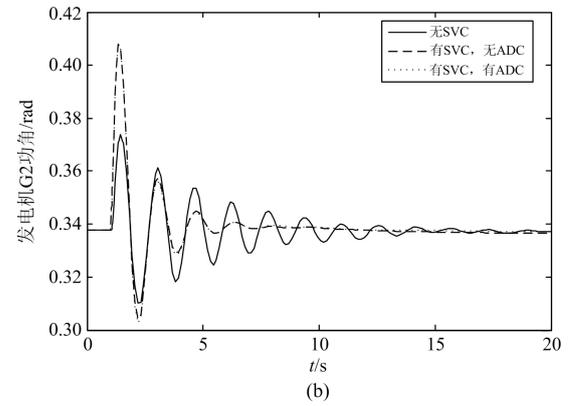
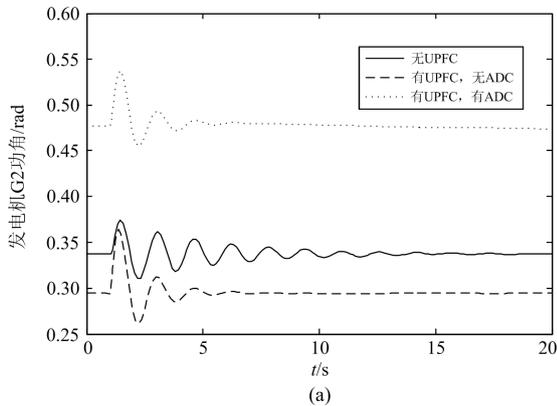
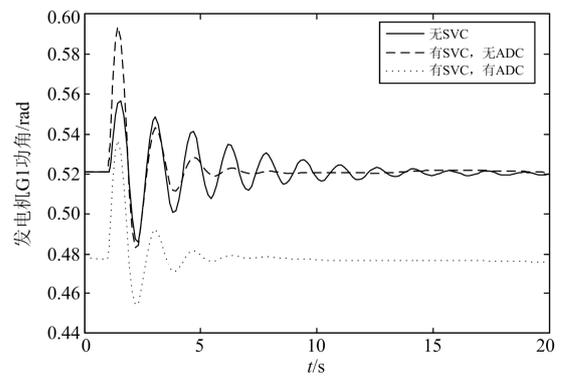
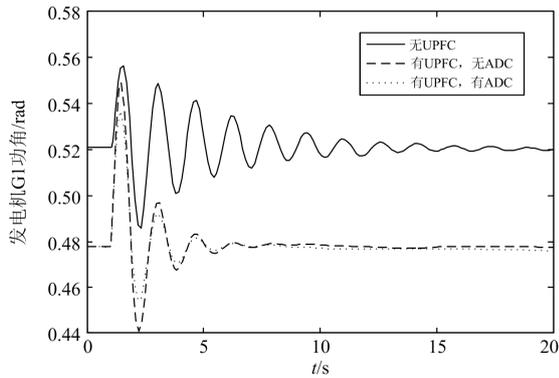
$t=1.3$  s 时故障消除, 线路重新接入系统, 仿真时间为 20 s, 系统频率为 50 Hz。初始条件下, 风机出力 70 MW, 联络线传输功率从区域 1 流向区域 2, 为 468.16 MW。

图 10、图 11 分别为发电机相对平衡节点的功角响应曲线和母线电压响应曲线。从响应曲线的结果来看, 系统发生三相短路故障时, 功角和电压均发生围绕稳定运行点减幅振荡的现象。这是由于当系统发生三相短路时, 原动机的电磁功率和机械功率失去平衡, 系统功角曲线发生改变, 加速面积大于制动面积, 并列运行在同一系统的发电机相对角度发生摇摆, 导致系统中各电气元件电压和电流发生波动, 距离短路地点较近的母线 7 与母线 9 电压发生骤降; 在故障切除之后, 系统的功角特性曲线再次发生改变, 在系统固有阻尼、UPFC 和 SVC 的作用下, 加速面积小于制动面积, 转子角回摆, 反映在电路上就是二者围绕稳定运行点上下振荡。从图 10 和图 11 中不难发现, 未加装控制器的响应曲线振幅较大、振荡时间较长; 而 UPFC 与 SVC 的接入都起到了降低振荡幅度、缩短振荡周期的作用; 当 UPFC 与 SVC 同时接入系统中, 其振荡曲线的振幅与振荡时间不仅小于未加装控制器的响应曲线, 同时也小于单独加装 UPFC 或 SVC 的响应曲线。

表 3 不同联络线传输功率下的部分特征根

Table 3 Part of eigenvalues for different tie-line power

传输功率/MW	振荡模式	Case1			Case2			相关机组
		特征根	频率/Hz	阻尼比/%	特征根	频率/Hz	阻尼比/%	
468.16	区域模式 1	-0.2716±j4.0351	0.643 7	6.72	-1.0352±j3.4576	0.574 4	28.68	G1,G3
	区域模式 2	-0.3073±j0.9271	0.155 5	31.46	-0.6421±j0.8920	0.174 9	58.42	G1,G2,G3,G4,DFIG
562.52	区域模式 1	-0.2563±j3.9980	0.637 6	6.40	-1.0295±j3.4260	0.569 4	28.78	G1,G3
	区域模式 2	-0.3014±j0.9822	0.163 5	29.34	-0.5930±j0.9480	0.178 0	53.03	G1,G2,G3,G4,DFIG
656.18	区域模式 1	-0.2398±j3.9447	0.629 0	6.07	-1.0187±j3.3873	0.563 0	28.80	G1,G3
	区域模式 2	-0.2942±j1.0436	0.172 6	27.13	-0.6017±j1.0153	0.187 8	50.98	G1,G2,G3,G4,DFIG
748.94	区域模式 1	-0.2173±j3.8727	0.617 3	5.60	-1.2153±j3.4890	0.588 0	32.89	G1,G3
	区域模式 2	-0.2871±j1.1150	0.183 3	24.94	-0.6542±j1.0202	0.192 9	53.98	G1,G2,G3,G4,DFIG
传输功率/MW	振荡模式	Case3			Case4			相关机组
		特征根	频率/Hz	阻尼比/%	特征根	频率/Hz	阻尼比/%	
468.16	区域模式 1	-0.8004±j3.8423	0.624 6	20.39	-0.8095±j4.1809	0.677 8	19.01	G1,G3
	区域模式 2	-0.6361±j0.8323	0.174 9	60.72	-0.6076±j0.8298	0.163 7	59.08	G1,G2,G3,G4,DFIG
562.52	区域模式 1	-0.7472±j3.7186	0.603 7	19.70	-0.7748±j4.1434	0.670 9	18.38	G1,G3
	区域模式 2	-0.6335±j0.8942	0.174 4	57.81	-0.5565±j0.8728	0.164 7	53.76	G1,G2,G3,G4,DFIG
656.18	区域模式 1	-0.6604±j3.4327	0.556 4	18.89	-0.7336±j4.0766	0.659 2	17.71	G1,G3
	区域模式 2	-0.6599±j0.9695	0.186 7	56.27	-0.5551±j0.9248	0.171 7	51.46	G1,G2,G3,G4,DFIG
748.94	区域模式 1	-0.5734±j3.2071	0.518 5	17.60	-0.6808±j3.9715	0.641 3	16.90	G1,G3
	区域模式 2	-0.6671±j1.0595	0.199 3	53.28	-0.5361±j0.9743	0.177 0	48.21	G1,G2,G3,G4,DFIG



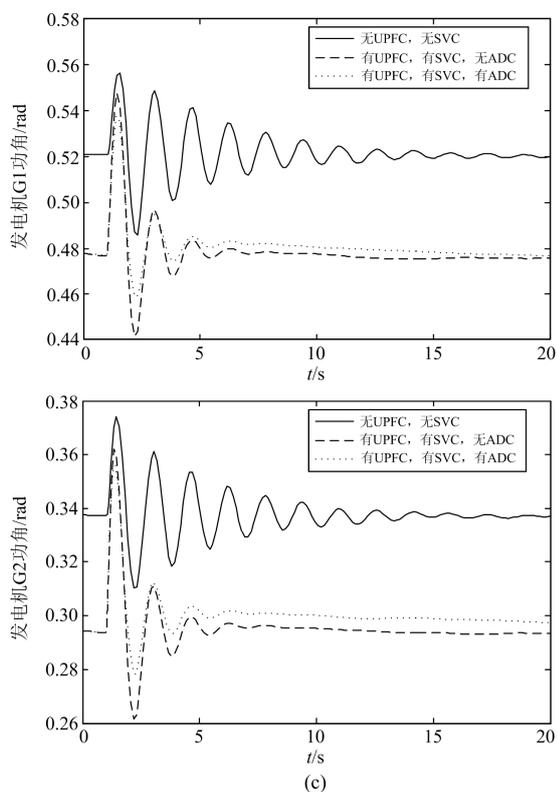


图 10 功角响应曲线图

Fig. 10 Response curve of power angle

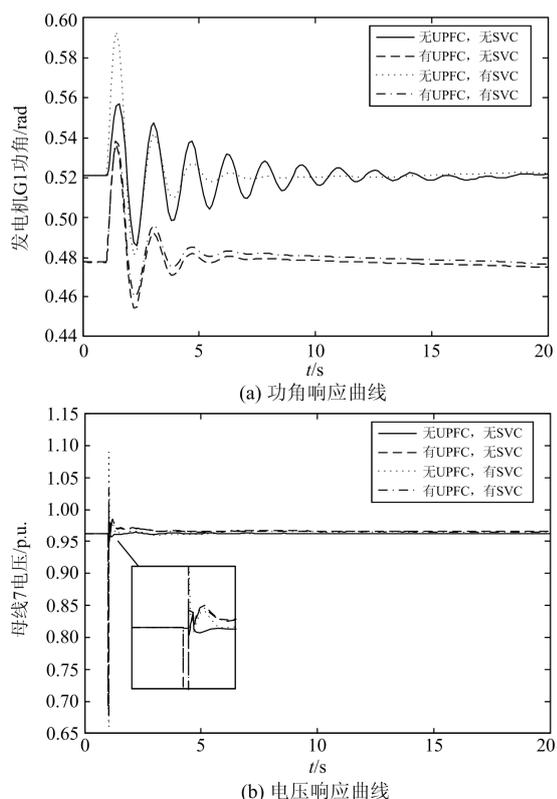


图 11 不同工况下的系统响应曲线

Fig. 11 Response curves of various cases

## 6 结语

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个角度系统分析了 UPFC 对含风电电力系统阻尼特性的影响。

本文构建了 UPFC、SVC 及含风电互联系统的数学模型, 采用留数指标定位 FACTS 装置, 并设计了附加阻尼控制器, 在一 2 区域互联系统上, 采用特征值和时域仿真方法, 系统分析了所提方法对改善含风电电力系统阻尼特性的效果, 结果表明:

(1) FACTS 装置的接入减小了系统发生短路故障时的电压降落, 维持电力系统有功功率、无功功率以及发电机转速的稳定性, 提高了含风电互联系统的阻尼, 改善了系统的阻尼特性。

(2) FACTS 装置的接入使得区域间模式的阻尼得到了一定的提高, 低频振荡得到了一定的抑制, 并在系统发生三相短路时提高了发电机的有功输出和电压特性。

(3) 多种 FACTS 装置的联合控制也可以进一步改善含风电互联系统的阻尼特性, 但其相互耦合作用会影响其效果, 因此多目标的控制器参数优化为进一步改善含风电系统阻尼特性的研究方向。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.  
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [3] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.  
XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [4] 杨晓静, 秦超. 考虑风电调度策略的电力系统随机潮流

- 流计算[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 54-59.
- YANG Xiaojing, QIN Chao. Probabilistic load flow calculation of power systems considering wind power dispatching strategies[J]. Electric Power, 2018, 51(6): 54-59.
- [5] 李立, 鲁宗相, 周双喜, 等. 柔性交流输电系统设备对电力系统暂态失稳风险的影响[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 11-16.
- LI Li, LU Zongxiang, ZHOU Shuangxi, et al. Impact of flexible AC transmission system device on power system transient instability risks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 11-16.
- [6] BAGCHI S, GOSWAMI S, BHADURI R, et al. Small signal stability analysis and comparison with DFIG incorporated system using FACTS devices[C] // 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), July 4-6, 2016, Delhi, India: 1-5.
- [7] PANAHA S F, PANAHA T F, GHANNAD G A. Reactive power compensation in wind power plant with short circuit in power plant line via UPFC[C] // 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), November 20-23, 2016, Birmingham, UK: 173-176.
- [8] GOLSHANNAVAZ S, AMINIFAR F, NAZARPOUR D. Application of UPFC to enhancing oscillatory[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1961-1968.
- [9] 杨林, 蔡晖, 汪惟源, 等. 500 kV 统一潮流控制器在苏州南部电网的工程应用[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 47-53.
- YANG Lin, CAI Hui, WANG Weiyuan, et al. Application of 500 kV UPFC in Suzhou Southern Power Grid[J]. Electric Power, 2018, 51(2): 47-53.
- [10] BHARTI S, DEWANGAN S, RAM S. Performance of wind farm distribution system under balanced and unbalanced condition with SVC & STATCOM[C] // 2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), December 14-16, 2016, Bhopal, India: 182-187.
- [11] BIAN X Y, GENG Y, LO K L, et al. Coordination of PSSs and SVC damping controller to improve probabilistic small-signal stability of power system with wind farm integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 2371-2382.
- [12] 钱臻, 刘建坤, 陈静, 等. 计及风电不确定性的含 UPFC 电力系统的两阶段最优潮流[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 80-86.
- QIAN Zhen, LIU Jiankun, CHEN Jing, et al. Two-stage OPF considering wind-power uncertainty for power system with UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 80-86.
- [13] 张宁宇, 刘建坤, 陈静, 等. 基于柔性负荷及 UPFC 的低频振荡抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 82-87.
- ZHANG Ningyu, LIU Jiankun, CHEN Jing, et al. Low frequency oscillation suppression method based on flexible load and UPFC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 82-87.
- [14] 饶成诚, 王海云, 吴寒, 等. UPFC 提高异步风电机组故障穿越能力的分析[J]. 中国电力, 2013, 46(8): 35-39.
- RAO Chengcheng, WANG Haiyun, WU Han, et al. Hybrid damping control strategy for LLCL filters of PV systems[J]. Electric Power, 2013, 46(8): 35-39.
- [15] 熊宁, 朱文广, 程虹, 等. 基于 UPFC 风力发电系统控制优化研究[J]. 现代电子技术, 2017, 40(7): 131-134.
- XIONG Ning, ZHU Wenguang, CHENG Hong, et al. Optimization study on wind power generation system control based on UPFC[J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(7): 131-134.
- [16] KANO M, MAEKAWA T, TAKESHITA T, et al. Comparison of converter arrangement of series and shunt converters in UPFC for distribution system control[C] // 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), November 20-23, 2016, Birmingham, UK: 431-436.
- [17] 周绍元, 李志勇, 陈卓. 适用于 UPFC 多个控制策略间平滑切换的建模[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 97-102.
- ZHOU Shaoyuan, LI Zhiyong, CHEN Zhuo. Modeling of smooth handoff suitable for UPFC between multiple control strategies[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 97-102.
- [18] 李兰芳. 输电系统 SVC 电压调节器增益自适应控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 61-66.
- LI Lanfang. Gain adaptive control method of the voltage regulator for SVC in transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 61-66.
- [19] 于淼, 谢欢, 宋玮, 等. 风电汇集地区 SVC 控制方式对电压异常振荡影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 73-78.
- YU Miao, XIE Huan, SONG Wei, et al. Impact of SVC control mode on voltage abnormal oscillation in wind power influx area[J]. Automation of Electric Power Systems,

- 2017, 41(1): 73-78.
- [20] 熊小伏, 张涵轶, 欧阳金鑫. 含 SVC 双馈风电机组暂态输出特性仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 89-93, 99.  
XIONG Xiaofu, ZHANG Hanyi, OUYANG Jinxin. Simulation analysis on transient output characteristics of DFIG with SVC[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 89-93, 99.
- [21] 郑超. SVC 错位补偿对风机高电压脱网威胁及应对措施[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2750-2757.  
ZHENG Chao. Study on threat of wind turbine tripping due to overvoltage caused by SVC malposition compensation and counter measures[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2750-2757.
- [22] 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 compensator design based on eigenvalue sensitivity analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(14): 9-14.
- [23] 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.
- [24] 付亦殊, 陈红坤, 姜欣, 等. 促进大规模风电消纳的双层调峰补偿机制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 51-57.  
FU Yishu, CHEN Hongkun, JIANG Xin, et al. A bi-layer peak-regulation compensation mechanism for large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 51-57.
- [25] 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.
- [26] NOURELDEEN O, HAMDAM I. Design of robust intelligent protection technique for large-scale grid-connected wind farm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 169-182. DOI: 10.1186/s41601-018-0090-4.

收稿日期: 2019-06-06; 修回日期: 2019-11-12

作者简介:

和萍(1980—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制、风电并网; E-mail: hplkz@126.com

陈婕(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事风电并网后电力系统稳定性分析与控制方面的研究;

耿斯涵(1992—), 男, 硕士, 主要从事电力系统稳定性分析控制、FACTS 装置等方面的研究。

(编辑 魏小丽)