

计及风电和燃料电池的综合能源 系统阻尼特性分析

和 萍, 祁 盼, 申润杰, 方祺元, 李从善, 武小鹏

(郑州轻工业大学电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:综合能源系统可协调多种能源,有效提升新能源利用效率,已成为促进能源可持续发展的重要手段,研究多能源接入电力系统影响已成为综合能源系统发展的重要内容。针对计及风电和燃料电池联合并网运行的电力综合能源系统阻尼特性展开研究。首先,构建风电机组和燃料电池的数学模型,导出两者并网后系统小干扰稳定分析模型;之后,采用特征根分析和时域仿真分析法,针对算例系统研究不同运行工况/因素下计及风电和燃料电池的互联系统阻尼特性,包括其不同容量配比、不同接入方式以及联络线传输功率变化等。研究结果可为评估综合能源系统消纳新能源发电的能力及稳定运行提供技术参考。

关键词:综合能源系统;风力发电;固体氧化物燃料电池;阻尼特性

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.01.002 中图分类号:TM715 文章编号:1673-9140(2020)01-0014-10

Analysis of damping characteristics of an integrated energy system with hybrid wind-fuel cells integrated

HE Ping, QI Pan, SHEN Runjie, FANG Qiyuan, LI Congshan, WU Xiaopeng

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

Abstract: The integrated energy system can integrate multiple kinds of energy sources and effectively improve the utilization efficiency of renewable energy generation, and represents a significant means to promote the sustainable development of energy. The research on the impacts of multi-energy connected on the power system has become an essential part for the development of the integrated energy system. In this paper, the damping characteristics of an integrated energy system with hybrid wind-fuel cells integrated are studied. The mathematical models of wind turbines and fuel cells are constructed and the stability analysis model of small disturbance then derived. The damping characteristics of the interconnected power system with wind power units and fuel cells under different operating conditions are studied for a sample power system, including different capacity ratios, different access modes, and different levels of tie-line transmission power, using the eigenvalue analysis and time-domain simulation. The research results can provide a reference for the integrated energy system to accommodate renewable energy and operate stably.

Key words: integrated energy system; wind power; solid oxide fuel cell; damping characteristic

随着环境和能源问题的日益严峻,构建以可再生能源为主题的绿色、低碳、清洁的综合能源系统(integrated energy system, IES)已成为当今世界重大战略举措^[1-4]。其中,含风电场和燃料电池发电的 IES 为平抑风电的波动性、降低弃风率提供了一种新的思路:利用电转氢技术,将过剩风能制氢,通过燃料电池进行再存储和消纳,进而提高系统的风电消纳能力。在现有新能源发电系统中,风能和燃料电池并网发电模式在实际工程应用中已有所涉及。因此,针对风电和燃料电池并网对电力系统稳定性的影响研究也得到了国内外众多学者的广泛重视。

围绕利用氢储能燃料电池系统与风电系统并网发电对系统小干扰稳定的影响国内外已做了相关研究,文献[5]从风电并网容量、外送距离、联络线传输功率等多角度研究了其对电力系统小干扰稳定性的影响;文献[6]提出了一种含固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)电站的多机电力系统的小干扰稳定模型,设计了基于并网 SOFC 电站局部模型的电力系统稳定器,并采用模式分析和非线性仿真方式进行了分析;文献[7]采用基于模态控制理论的相位补偿方法,设计了一种带有阻尼控制器的静止同步补偿器,用以改善系统的区域间振荡模式,进而提升系统的阻尼特性,增强系统稳定性;文献[8]应用常规阻尼转矩分析方法研究燃料电池发电对电力系统阻尼振荡的影响,结果表明,燃料电池对电力系统振荡稳定性的影响取决于系统的负荷状况,系统重载时,燃料电池电站给系统提供正的阻尼转矩,系统轻载时,反之;文献[9]从静止同步串联补偿器补偿水平、电气、机械和网络参数变化等多角度研究了其对电力系统小干扰稳定性的影响。针对风电和燃料电池接入对电力系统电压稳定和暂态稳定性的影响;文献[10]研究了风电场接入电网时其不同电气主接线方式和电网拓扑结构对电力系统稳定性的影响,其认为风电场的主接线方式和辐射性拓扑结构可以改善电网的电压稳定性;文献[11]以分布式发电系统为例,通过对燃料电池逆变器的设计,研究燃料电池在不同渗透率下对系统暂态稳定性的影响。合理的控制策略对电力系统安全稳定运行也起着至关重要的作用,围绕这一领域,文献[12]指出

与比例积分(proportional integral, PI)控制器相比,采用自抗扰控制技术时,SOFC 电厂将以较低的总谐波失真率向负载和电网提供高质量电能,负载和网络参数发生变化时系统具有更强的鲁棒性;文献[13]采用最优 PI 控制器控制 SOFC 电站提供的有功功率,同时用 2 个比例控制器使其满足自身的物理约束和运行状态约束,提升系统的可靠性、稳定性。此外,文献[14-16]对固体氧化物燃料电池电站进行了相关研究,主要集中在并网 SOFC 电站本身的发电原理、运行和控制,包括 SOFC 集中模型的建立,已取得重大进展;文献[17]提出一种实时功率互补控制策略,利用 SOFC 快速的负荷跟踪特性和充足的电功率平滑直驱永磁风力发电机系统输出的功率波动。

针对含燃料电池系统与风电系统并网发电对系统稳定性的研究已经取得了阶段性的成果,但现有的分析多是侧重其单独并网对系统的影响,考虑风电和燃料电池联合并网运行对电力系统阻尼特性影响方面鲜见报道。在此背景下,该文搭建了风电机组和燃料电池的模型,理论上分析了两者并网后系统小干扰稳定分析模型,采用特征根分析和时域仿真分析法,在 IEEE 四机两区域系统上研究了不同工况下含风电和燃料电池系统的阻尼特性,包括不同容量配比、不同接入方式以及联络线传输功率变化等因素。以期研究结果能够为含风电和燃料电池的综合能源系统的稳定运行提供参考,为进一步利用其协同控制及储能装置等提高风电消纳能力提供技术参考。

1 DFIG 风电机组和 SOFC 的模型

1.1 DFIG 风电机组模型

双馈异步发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)是目前市场广泛使用的并网型风力发电机,如图 1 所示,DFIG 的定子绕组直接与电网相连,转子绕组通过一个转子侧变换器(rotor-side converter, RSC)、直流电容、网侧变换器(grid-side converter, GSC)和升压变压器与电网相连。

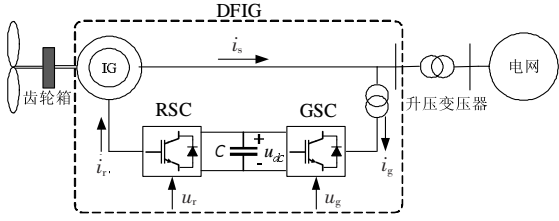


图1 双馈异步风力发电机组并网示意

Figure 1 Illustration of a DFIG-based wind turbine generator integrated in a power system

DFIG 基于感应发电机,其在 $d-q$ 轴的详细数学模型^[18]为

$$\begin{cases} \frac{x'_s}{\omega_s} \frac{di_{sd}}{dt} = -\left(r_s + \frac{x_s - x'_s}{\omega_s T'_0}\right) i_{sd} + x'_s i_{sq} + u_{sd} - \\ (1 - s_r) e'_{sd} + \frac{1}{\omega_s T'_0} e'_{sq} - \frac{L_m}{L_r} u_{rd} \\ \frac{x'_s}{\omega_s} \frac{di_{sq}}{dt} = -\left(r_s + \frac{x_s - x'_s}{\omega_s T'_0}\right) i_{sq} + x'_s i_{sd} + u_{sq} - \\ (1 - s_r) e'_{sq} - \frac{1}{\omega_s T'_0} e'_{sd} - \frac{L_m}{L_r} u_{rq} \\ \frac{de'_{sd}}{dt} = s_r \omega_s e'_{sq} - \omega_s \frac{L_m}{L_r} u_{rq} - \frac{1}{T'_0} [e'_{sd} + (x_s - \\ x'_s) i_{sq}] \\ \frac{de'_{sq}}{dt} = -s_r \omega_s e'_{sd} + \omega_s \frac{L_m}{L_r} u_{rd} - \frac{1}{T'_0} [e'_{sq} - (x_s - \\ x'_s) i_{sd}] \end{cases} \quad (1)$$

式中 L_s 和 L_r 分别为定子自感和转子自感; L_m 是定转子互感; r_s, r_r, x_s 和 x'_s 分别为定子电阻、转子电阻、定子电抗和定子暂态电抗; s_r 是转子转差率; ω_s 是发电机同步转速; e'_{sd} 和 e'_{sq} 为定子后暂态电势的 $d-q$ 轴分量; T'_0 为转子时间常数; u_{sd}, u_{sq} 和 u_{rd}, u_{rq} 分别为定子电压和转子电压的 $d-q$ 轴分量; i_{sd} 和 i_{sq} 为定子电流的 $d-q$ 轴分量。

转子侧变换器提供励磁电压,电网侧变换器维持电容电压恒定、调节功率因数,电容器为 2 个变换器的直流侧提供电压支撑。功率方程可以表示为

$$u_{dc} C \frac{du_{dc}}{dt} = u_{gd} i_{gd} + u_{gq} i_{gq} - u_{rd} i_{rd} - u_{rq} i_{rq} \quad (2)$$

式中 u_{rd} 和 u_{rq} 分别为转子侧变换器电压的 $d-q$ 轴分量; i_{rd} 和 i_{rq} 分别为转子电流的 $d-q$ 轴分量; i_{gd}, i_{gq} 和 u_{gd}, u_{gq} 分别为网侧变换器电流和电压的 $d-q$ 轴分量; u_{dc} 为电容器的电压; C 为电容容量。

1.2 SOFC 模型

燃料电池堆栈由多个电池串联而成,其输出电气量为直流量,经过逆变环节转变为交流分量后由升压变压器接入交流电网,如图 2 所示。SOFC 的动态模型如图 3 所示。

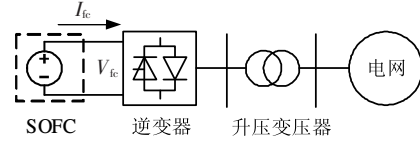


图2 SOFC 并网示意

Figure 2 Illustration of a SOFC integrated in a power system

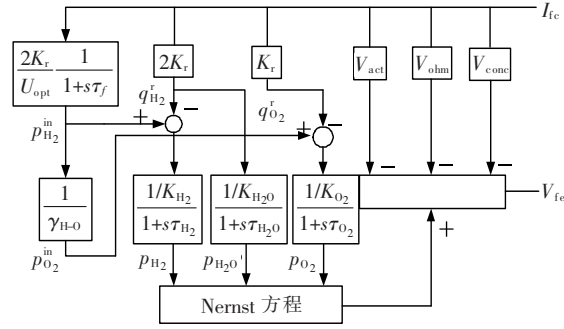


图3 SOFC 动态模型

Figure 3 Dynamic model of a SOFC

电池中氢气、氧气、水蒸气的气体分压为

$$\begin{cases} p_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2}s} (q_{H_2}^{in} - 2K_r I_{fc}) \\ p_{O_2} = \frac{1/K_{O_2}}{1 + \tau_{O_2}s} (q_{O_2}^{in} - 2K_r I_{fc}) \\ p_{H_2O} = \frac{1/K_{H_2O}}{1 + \tau_{H_2O}s} \cdot 2K_r I_{fc} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $p_{H_2}, p_{O_2}, p_{H_2O}$ 分别为 H_2, O_2, H_2O 集总电池的气体分压; $K_{H_2}, K_{O_2}, K_{H_2O}$ 分别为 H_2, O_2, H_2O 的阀摩尔常数; $\tau_{H_2}, \tau_{O_2}, \tau_{H_2O}$ 分别为 3 种气体的动态响应时间常数; $q_{H_2}^{in}$ 和 $q_{O_2}^{in}$ 分别为 H_2 和 O_2 的输入摩尔流量; K_r 为常数; I_{fc} 为堆栈电流; s 为拉氏算子。

单个电池堆的输出电压为^[19-20]:

$$V_{fc} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (4)$$

式中 V_{fc} 为电池堆电压; E 为能斯特可逆电势; V_{act} 为活性极化电压; V_{ohm} 为电阻损耗电压; V_{conc} 为浓差极化电压。

$$E = N_0 \left[E_0 + \frac{RT}{2F} \left(\ln \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}} \right) \right] \quad (5)$$

$$V_{\text{act}} = \frac{RT}{F} \arcsin h \left(\frac{I_{\text{fc}}}{2I_0} \right) \quad (6)$$

$$V_{\text{ohm}} = rI_{\text{fc}} \quad (7)$$

$$V_{\text{conc}} = \frac{RT}{2F} \ln \left(1 - \frac{I_{\text{fc}}}{i_L} \right) \quad (8)$$

式中 N_0 为电池堆中串联电池的数目; E_0 为标准电势; F 为法拉第常数; R 为通用气体常数; T 为电池实时温度; I_{fc} 为电池堆电流; i_L 为限制电流; r 为电池电阻值; I_0 为考虑活性极化损失的交换电流值。

2 含 DFIG 和 SOFC 的电力系统小干扰稳定模型

构建含 DFIG 和 SOFC 的电力系统小干扰分析模型,如图 4 所示。假设 DFIG 风电场和 SOFC 电站从不同点并入电力系统,DFIG 风电场注入系统功率为 $P_D + jQ_D$,接入点(point of common connection, PCC)电压幅值为 V_D ,SOFC 电站注入系统功率为 $P_S + jQ_S$,接入点电压幅值为 V_S 。

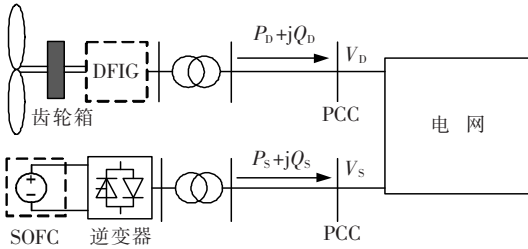


图 4 DFIG 和 SOFC 并网示意

Figure 4 Illustration of DFIG and SOFC integrated in a power system

当 DFIG 风电场和 SOFC 电站并入系统时,DFIG 风电场、SOFC 电站、电力系统线性化状态空间方程分别为

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{X}}_D = \mathbf{A}_D \Delta \mathbf{X}_D + \mathbf{B}_D \Delta V_D \\ \Delta P_D = \mathbf{C}_{D1} \Delta \mathbf{X}_D + \mathbf{D}_{D1} \Delta V_D \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \Delta Q_D = \mathbf{C}_{D2} \Delta \mathbf{X}_D + \mathbf{D}_{D2} \Delta V_D \\ \Delta \dot{\mathbf{X}}_S = \mathbf{A}_S \Delta \mathbf{X}_S + \mathbf{B}_S \Delta V_S \\ \Delta P_S = \mathbf{C}_{S1} \Delta \mathbf{X}_S + \mathbf{D}_{S1} \Delta V_S \end{cases} \quad (10)$$

$$\Delta Q_S = \mathbf{C}_{S2} \Delta \mathbf{X}_S + \mathbf{D}_{S2} \Delta V_S$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{X}}_G = \mathbf{A}_1 \Delta \mathbf{X}_G + \mathbf{B}_1 \Delta P_D + \mathbf{B}_2 \Delta P_S + \\ \mathbf{B}_3 \Delta Q_D + \mathbf{B}_4 \Delta Q_S \\ \Delta V_D = \mathbf{C}_1 \Delta \mathbf{X}_G + \mathbf{D}_1 \Delta P_D + \mathbf{D}_2 \Delta Q_D \\ \Delta V_S = \mathbf{C}_2 \Delta \mathbf{X}_G + \mathbf{D}_3 \Delta P_S + \mathbf{D}_4 \Delta Q_S \end{cases} \quad (11)$$

式中 $\Delta \mathbf{X}_D$ 是与 DFIG 相关的状态变量的矢量; $\Delta \mathbf{X}_S$ 是与 SOFC 相关的状态变量的矢量; $\Delta \mathbf{X}_G$ 是与电力系统中同步机组相关的状态变量的矢量。

基于线性化理论和李雅普诺夫稳定法则,由式(9)~(11)可得含 DFIG 和 SOFC 的电力系统状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}_D = \mathbf{A}_{11} \mathbf{X}_D + \mathbf{A}_{12} \mathbf{X}_S + \mathbf{A}_{13} \mathbf{X}_G \\ \dot{\mathbf{X}}_S = \mathbf{A}_{21} \mathbf{X}_D + \mathbf{A}_{22} \mathbf{X}_S + \mathbf{A}_{23} \mathbf{X}_G \\ \dot{\mathbf{X}}_G = \mathbf{A}_{31} \mathbf{X}_D + \mathbf{A}_{32} \mathbf{X}_S + \mathbf{A}_{33} \mathbf{X}_G \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}_D \\ \dot{\mathbf{X}}_S \\ \dot{\mathbf{X}}_G \end{cases} = \mathbf{A} \begin{cases} \mathbf{X}_D \\ \mathbf{X}_S \\ \mathbf{X}_G \end{cases} \quad (12)$$

其中,

$$\mathbf{A}_{11} = \mathbf{A}_D + \mathbf{B}_D (\mathbf{I} - \mathbf{D}_1 \mathbf{D}_{D1} - \mathbf{D}_2 \mathbf{D}_{D2})^{-1} (\mathbf{D}_1 \mathbf{C}_{D1} + \mathbf{D}_2 \mathbf{C}_{D2})$$

$$\mathbf{A}_{12} = 0$$

$$\mathbf{A}_{13} = \mathbf{B}_D (\mathbf{I} - \mathbf{D}_1 \mathbf{D}_{D1} - \mathbf{D}_2 \mathbf{D}_{D2})^{-1} \mathbf{C}_1$$

$$\mathbf{A}_{21} = 0$$

$$\mathbf{A}_{22} = \mathbf{A}_S + \mathbf{B}_S (\mathbf{I} - \mathbf{D}_3 \mathbf{D}_{S1} - \mathbf{D}_4 \mathbf{D}_{S2})^{-1} (\mathbf{D}_3 \mathbf{C}_{S1} + \mathbf{D}_4 \mathbf{C}_{S2})$$

$$\mathbf{A}_{23} = \mathbf{B}_S (\mathbf{I} - \mathbf{D}_3 \mathbf{D}_{S1} - \mathbf{D}_4 \mathbf{D}_{S2})^{-1} \mathbf{C}_2$$

$$\mathbf{A}_{31} = \mathbf{B}_1 \mathbf{X}_{D1} + \mathbf{B}_3 \mathbf{C}_{D2} + (\mathbf{B}_1 \mathbf{D}_{D1} + \mathbf{B}_3 \mathbf{D}_{D2}) (\mathbf{I} - \mathbf{D}_1 \mathbf{D}_{D1} - \mathbf{D}_2 \mathbf{D}_{D2})^{-1} (\mathbf{D}_1 \mathbf{C}_{D1} + \mathbf{D}_2 \mathbf{C}_{D2})$$

$$\mathbf{A}_{32} = \mathbf{B}_2 \mathbf{C}_{S1} + \mathbf{B}_4 \mathbf{C}_{S2} + (\mathbf{B}_2 \mathbf{D}_{S1} + \mathbf{B}_4 \mathbf{D}_{S2}) (\mathbf{I} - \mathbf{D}_3 \mathbf{D}_{S1} - \mathbf{D}_4 \mathbf{D}_{S2})^{-1} (\mathbf{D}_3 \mathbf{C}_{S1} + \mathbf{D}_4 \mathbf{C}_{S2})$$

$$\mathbf{A}_{33} = \mathbf{A}_1 + (\mathbf{B}_1 \mathbf{D}_{D1} + \mathbf{B}_3 \mathbf{D}_{D2}) (\mathbf{I} - \mathbf{D}_1 \mathbf{D}_{D1} - \mathbf{D}_2 \mathbf{D}_{D2})^{-1} \mathbf{C}_1 + (\mathbf{B}_2 \mathbf{D}_{S1} + \mathbf{B}_4 \mathbf{D}_{S2}) (\mathbf{I} - \mathbf{D}_3 \mathbf{D}_{S1} - \mathbf{D}_4 \mathbf{D}_{S2})^{-1} \mathbf{C}_2$$

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{11} \\ \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{13} \\ \mathbf{A}_{21} \\ \mathbf{A}_{22} \\ \mathbf{A}_{23} \\ \mathbf{A}_{31} \\ \mathbf{A}_{32} \\ \mathbf{A}_{33} \end{cases} \quad (13)$$

当 DFIG 风电场和 SOFC 电站从同一点并入电力系统,接入点电压幅值为 V 时,DFIG 风电场、SOFC 电站、电力系统线性化状态空间方程分别为

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{X}}_D = \mathbf{A}_D \Delta \mathbf{X}_D + \mathbf{B}_D \Delta V \\ \Delta P_D = \mathbf{C}_{D1} \Delta \mathbf{X}_D + \mathbf{D}_{D1} \Delta V \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \Delta Q_D = \mathbf{C}_{D2} \Delta \mathbf{X}_D + \mathbf{D}_{D2} \Delta V \\ \Delta \dot{\mathbf{X}}_S = \mathbf{A}_S \Delta \mathbf{X}_S + \mathbf{B}_S \Delta V \\ \Delta P_S = \mathbf{C}_{S1} \Delta \mathbf{X}_S + \mathbf{D}_{S1} \Delta V \end{cases} \quad (15)$$

$$\Delta Q_S = \mathbf{C}_{S2} \Delta \mathbf{X}_S + \mathbf{D}_{S2} \Delta V$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{X}}_G = \mathbf{A}'_1 \Delta \mathbf{X}_G + \mathbf{B}'_1 (\Delta P_D + \Delta P_S) + \\ \mathbf{B}'_2 (\Delta Q_D + \Delta Q_S) \\ \Delta V = \mathbf{C}'_1 \Delta \mathbf{X}_G + \mathbf{D}'_1 (\Delta P_D + \Delta P_S) + \\ \mathbf{D}'_2 (\Delta Q_D + \Delta Q_S) \end{cases} \quad (16)$$

同理,可以得到含 DFIG 和 SOFC 的电力系统状态空间模型:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_D \\ \dot{\mathbf{X}}_S \\ \dot{\mathbf{X}}_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}'_{11} & \mathbf{A}'_{12} & \mathbf{A}'_{13} \\ \mathbf{A}'_{21} & \mathbf{A}'_{22} & \mathbf{A}'_{23} \\ \mathbf{A}'_{31} & \mathbf{A}'_{32} & \mathbf{A}'_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X}_D \\ \Delta \mathbf{X}_S \\ \Delta \mathbf{X}_G \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{A}'_{11} &= \mathbf{A}_D + \mathbf{B}_D (\mathbf{I} - \mathbf{D}'_1 \mathbf{D}_{D1} - \mathbf{D}'_1 \mathbf{D}_{S1} - \mathbf{D}'_2 \mathbf{D}_{D2} - \mathbf{D}'_2 \mathbf{D}_{S2})^{-1} (\mathbf{D}'_1 \mathbf{C}_{D1} + \mathbf{D}'_2 \mathbf{C}_{D2}) \\ \mathbf{A}'_{12} &= \mathbf{B}_D (\mathbf{I} - \mathbf{D}'_1 \mathbf{D}_{D1} - \mathbf{D}'_1 \mathbf{D}_{S1} - \mathbf{D}'_2 \mathbf{D}_{D2} - \mathbf{D}'_2 \mathbf{D}_{S2})^{-1} (\mathbf{D}'_1 \mathbf{C}_{S1} + \mathbf{D}'_2 \mathbf{C}_{S2}) \\ \mathbf{A}'_{13} &= \mathbf{B}_D (\mathbf{I} - \mathbf{D}'_1 \mathbf{D}_{D1} - \mathbf{D}'_1 \mathbf{D}_{S1} - \mathbf{D}'_2 \mathbf{D}_{D2} - \mathbf{D}'_2 \mathbf{D}_{S2})^{-1} \mathbf{C}'_1 \\ \mathbf{A}'_{21} &= \mathbf{B}_S (\mathbf{I} - \mathbf{D}'_1 \mathbf{D}_{D1} - \mathbf{D}'_1 \mathbf{D}_{S1} - \mathbf{D}'_2 \mathbf{D}_{D2} - \mathbf{D}'_2 \mathbf{D}_{S2})^{-1} (\mathbf{D}'_1 \mathbf{C}_{D1} + \mathbf{D}'_2 \mathbf{C}_{D2}) \\ \mathbf{A}'_{22} &= \mathbf{A}_S + \mathbf{B}_S (\mathbf{I} - \mathbf{D}'_1 \mathbf{D}_{D1} - \mathbf{D}'_1 \mathbf{D}_{S1} - \mathbf{D}'_2 \mathbf{D}_{D2} - \mathbf{D}'_2 \mathbf{D}_{S2})^{-1} (\mathbf{D}'_1 \mathbf{C}_{S1} + \mathbf{D}'_2 \mathbf{C}_{S2}) \\ \mathbf{A}'_{23} &= \mathbf{B}_S (\mathbf{I} - \mathbf{D}'_1 \mathbf{D}_{D1} - \mathbf{D}'_1 \mathbf{D}_{S1} - \mathbf{D}'_2 \mathbf{D}_{D2} - \mathbf{D}'_2 \mathbf{D}_{S2})^{-1} \mathbf{C}'_1 \\ \mathbf{A}'_{31} &= \mathbf{B}'_1 \mathbf{C}_{D1} + \mathbf{B}'_2 \mathbf{C}_{D2} + (\mathbf{B}'_1 \mathbf{D}_{D1} + \mathbf{B}'_1 \mathbf{D}_{S1} + \mathbf{B}'_2 \mathbf{D}_{D2} + \mathbf{B}'_2 \mathbf{D}_{S2}) (\mathbf{I} - \mathbf{D}'_1 \mathbf{D}_{D1} - \mathbf{D}'_1 \mathbf{D}_{S1} - \mathbf{D}'_2 \mathbf{D}_{D2} - \mathbf{D}'_2 \mathbf{D}_{S2})^{-1} (\mathbf{D}'_1 \mathbf{C}_{D1} + \mathbf{D}'_2 \mathbf{C}_{D2}) \\ \mathbf{A}'_{32} &= \mathbf{B}'_1 \mathbf{C}_{S1} + \mathbf{B}'_2 \mathbf{C}_{S2} + (\mathbf{B}'_1 \mathbf{D}_{D1} + \mathbf{B}'_1 \mathbf{D}_{S1} + \mathbf{B}'_2 \mathbf{D}_{D2} + \mathbf{B}'_2 \mathbf{D}_{S2}) (\mathbf{I} - \mathbf{D}'_1 \mathbf{D}_{D1} - \mathbf{D}'_1 \mathbf{D}_{S1} - \mathbf{D}'_2 \mathbf{D}_{D2} - \mathbf{D}'_2 \mathbf{D}_{S2})^{-1} (\mathbf{D}'_1 \mathbf{C}_{S1} + \mathbf{D}'_2 \mathbf{C}_{S2}) \\ \mathbf{A}'_{33} &= \mathbf{A}'_1 + (\mathbf{B}'_1 \mathbf{D}_{D1} + \mathbf{B}'_1 \mathbf{D}_{S1} + \mathbf{B}'_2 \mathbf{D}_{D2} + \mathbf{B}'_2 \mathbf{D}_{S2}) (\mathbf{I} - \mathbf{D}'_1 \mathbf{D}_{D1} - \mathbf{D}'_1 \mathbf{D}_{S1} - \mathbf{D}'_2 \mathbf{D}_{D2} - \mathbf{D}'_2 \mathbf{D}_{S2})^{-1} \mathbf{C}'_1 \end{aligned} \quad (18)$$

通过计算式(12)、(17)中状态矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{A}' 的特征值,可分析研究含 DFIG 和 SOFC 的电力系统小干扰稳定性。

3 算例与结果

3.1 算例系统模型

该文以图 5 所示的 IEEE 两区域四机互联系统^[21]为例,分析 DFIG 和 SOFC 对互联电力系统阻

尼特性的影响。该系统包括 2 个相似的区域系统,由一条弱联络线相连,每个区域内包含 2 个紧密耦合的机组,系统基准容量为 100 MVA,频率为 50 Hz。为简便分析,假设 DFIG 和 SOFC 的参数和运行状态各自保持不变,整个 DFIG 风电场和 SOFC 电站均由相应集中模型来替代。

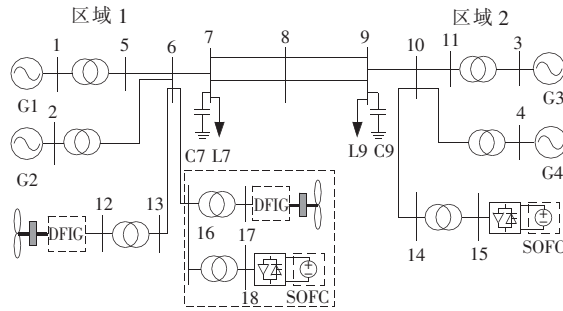


图 5 含 DFIG 和 SOFC 的 2 区域 4 机系统

Figure 5 Two-area four-unit interconnected power system with DFIG and SOFC

3.2 送电侧 DFIG 和 SOFC 容量变化对电力系统振荡模式的影响

研究 DFIG 和 SOFC 的容量变化对系统振荡模式的影响,通过改变接入送电侧(区域 1)中二者的容量配比,分析其对互联系统局部振荡模式和区域间振荡模式的影响。DFIG 容量依次取 10、30、70 MW,SOFC 容量依次取 100、200、300 MW。

当 DFIG 容量为 10 MW、SOFC 容量为 100 MW 时,系统部分特征值如表 1 所示,可以看出,系统原有 3 个振荡模式:模式 1 和模式 2 分别为区域 1 和区域 2 内发电机组之间的局部振荡,模式 3 为区域 1 和区域 2 内发电机组之间的区间振荡,当 DFIG 风电场和 SOFC 电站接入时系统增加了一个区域间振荡模式 4。

DFIG 和 SOFC 并网容量变化时系统振荡模式阻尼比如图 6 所示,分析图中数据可知:随着 DFIG

表 1 系统部分特征值

Table 1 Partial eigenvalues of the system

振荡模式	特征根	阻尼比/%	相关机组
模式 1	-1.111 4±j6.803 2	16.12	G1 G2
模式 2	-1.206 9±j7.192 3	16.55	G3 G4
模式 3	-0.328 5±j4.034 3	8.12	G1 G3
模式 4	-0.401 8±j0.804 1	44.70	G1-G4、DFIG

和 SOFC 容量的增加,受 SOFC 容量的影响,模式 2 的阻尼比整体呈现先增大后减小的趋势;模式 1 和模式 3 的阻尼比逐渐增大,且受 SOFC 并网容量的影响较大;模式 4 的阻尼比受 DFIG 容量影响较大,当 DFIG 和 SOFC 的容量增大时,阻尼比逐渐减小。

电机 G1 功角曲线、节点 10 电压幅值曲线的振荡幅度越小、收敛速度越快;发电机 G4 的输出有功功率和无功功率响应曲线随二者出力的增大,振荡幅度也逐渐减小。

- 选取以下 3 种工况对系统动态响应进行分析:
- Case 1:未接入 DFIG 和 SOFC;
 - Case 2: DFIG 出力为 30 MW,SOFC 出力为 100 MW;
 - Case 3:DFIG 出力为 70 MW,SOFC 出力为 200 MW。

通过在不同容量配比下,对含 DFIG 和 SOFC 的互联系统振荡模式分析和时域仿真分析,可以得出:DFIG 和 SOFC 的接入会增大系统阻尼比,改善系统的稳定性,且随着二者并网容量的增大,改善作用更加显著。

3.3 DFIG 和 SOFC 接入点不同对电力系统阻尼特性的影响

假设母线 7 上的负荷在 1.00~1.05 s 期间向上波动 10%,仿真时间设置为 20 s,系统频率为 50 Hz,图 7 给出在不同容量配比下系统发生负荷扰动时发电机 G1 的功角曲线、节点 10 电压曲线及发电机 G4 的输出有功、无功功率曲线。由图 7 可知,在系统发生负荷扰动时,DFIG 和 SOFC 出力越大,发

为分析互联系统在不同接入点消纳新能源时对系统阻尼特性的影响,在此主要选择以下工况进行分析:

- Case 4:未接入 DFIG 和 SOFC;
- Case 5:DFIG 和 SOFC 均接入区域 1,DFIG 出力 30 MW,SOFC 出力 100 MW;
- Case 6:DFIG 接入区域 1,出力 30 MW,SOFC 接入区域 2,出力 100 MW。

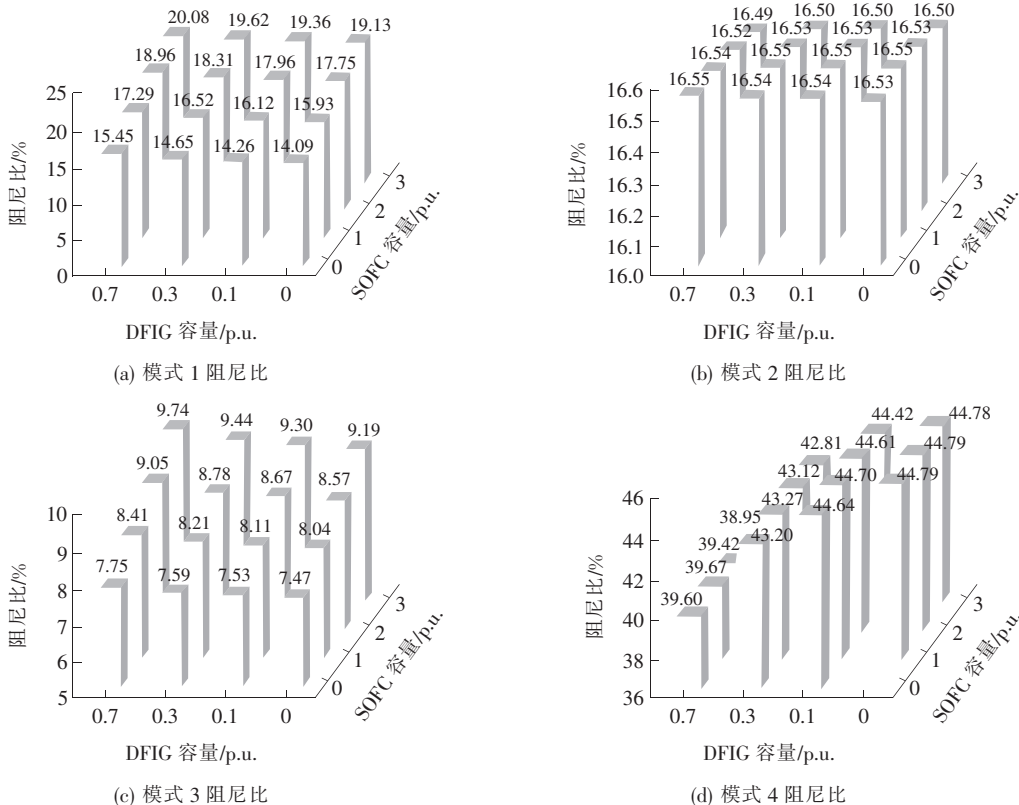


图 6 不同容量下系统振荡模式阻尼比

Figure 6 Damping ratios of the system oscillation mode under different capacities

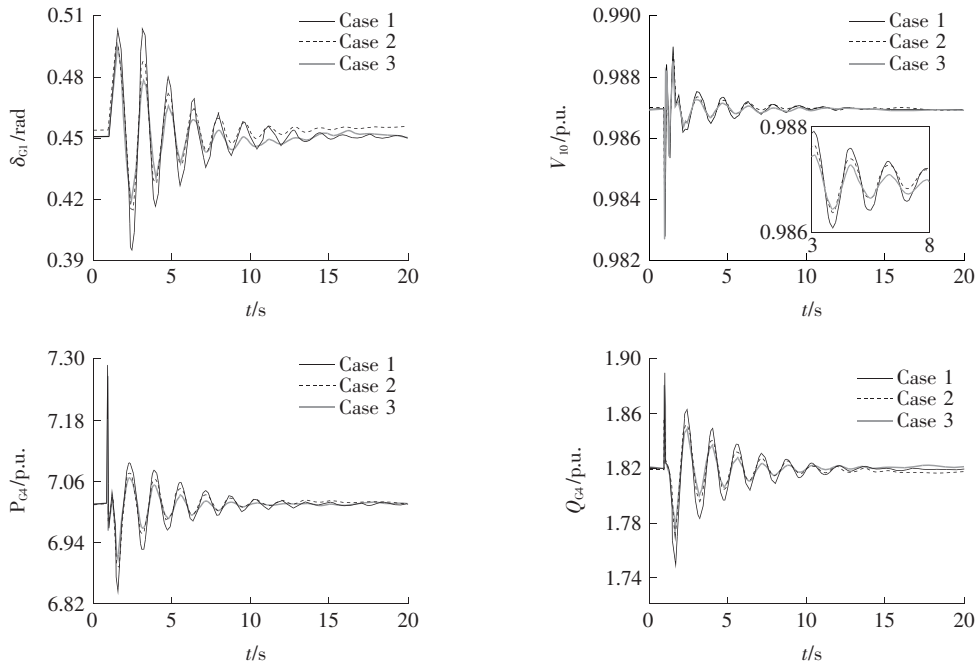


图7 不同容量配比下小干扰响应曲线

Figure 7 Small disturbance response curves under different capacity ratio

表2给出的是3种不同接入方式下系统部分特征根。由数据可知,系统原有3个振荡模式,DFIG与SOFC接入系统后,新增加了一个包含DFIG模式4;DFIG和SOFC接在区域1时,与原系统相比,模式1和模式3的阻尼比增大,模式2的阻尼比有所下降;DFIG和SOFC分别接在区域1和区域2

时,与原系统相比,模式1、模式2及模式3的阻尼比有不同程度的增加。与同时接在区域1相比,模式2和模式3的阻尼比有所上升,但模式1和模式4的阻尼比有所减小。DFIG和SOFC的2种接入方式都能增大系统的阻尼比,提升系统的稳定性。

表2 不同接入点下系统部分特征根

Table 2 Partial eigenvalues of the system under different integration points

振荡模式	工况	特征根	阻尼比/%	相关机组
模式1	Case 4	0.983 5±6.910 9	14.09	
	Case 5	-1.135 1±6.778 4	16.59	G1 G2
	Case 6	-1.020 3±6.886 1	14.66	
模式2	Case 4	-1.206 0±7.195 2	16.53	
	Case 5	-1.206 7±7.191 9	16.20	G3 G4
	Case 6	-1.319 0±7.122 2	18.21	
模式3	Case 4	-0.302 5±4.037 7	7.47	
	Case 5	-0.332 3±4.034 1	7.61	G1 G3
	Case 6	-0.334 1±4.050 4	8.22	
模式4	Case 4	—	—	—
	Case 5	-0.399 81±0.832 9	44.90	G1-G4
	Case 6	-0.400 1 ±0.837 3	43.12	DFIG

假设母线7上的负荷在1.00~1.05 s期间向上波动10%,仿真时间设置为20 s,系统频率为50 Hz,图8给出在系统发生负荷扰动时,不同接入方式下发电机G1功角、输出有功功率、发电机G3输出有功功率和节点6的电压幅值时域仿真图。DFIG和SOFC均接入区域1或分别接入区域1和区域2时,由图8可知,与原系统相比,发电机G1的功角曲线、输出有功功率曲线、发电机G3的输出有功功率和节点6电压幅值曲线的振荡幅度均有所减小,稳定时间相对较短;二者均接入区域1时的效果比DFIG接入区域1、SOFC接入区域2时略好。可以得出,DFIG和SOFC的2种接入方式均能增大系统的阻尼比,提高系统稳定性,且同时接入区域1的效果更好一些。

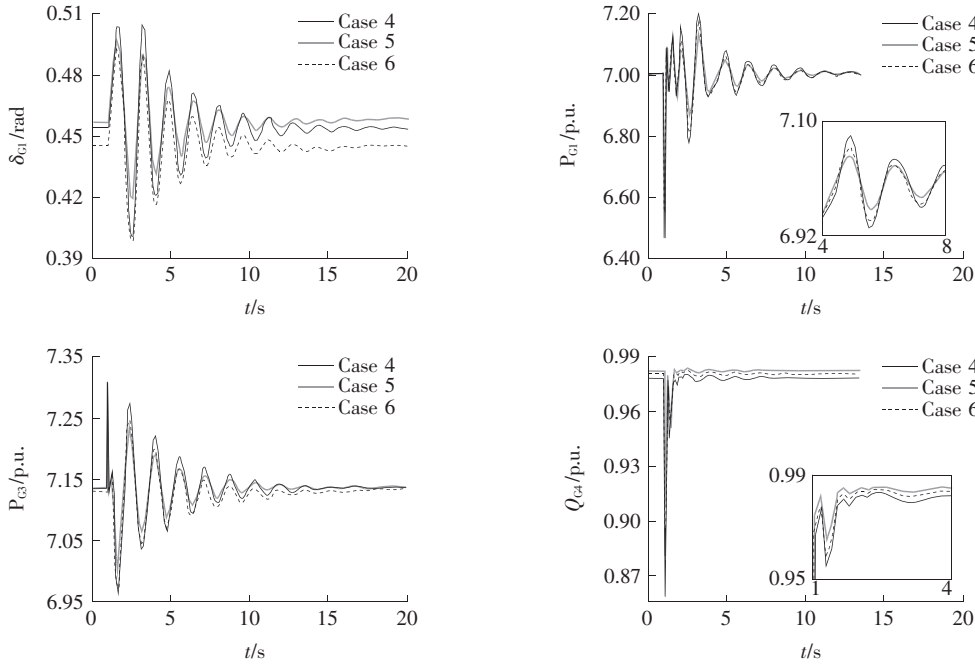


图 8 不同接入点下小干扰响应曲线

Figure 8 Small disturbance response curves under different integration points

3.4 联络线的传输功率对互联系统振荡模式的影响

发电机出力或负荷功率变化都会使联络线传送功率发生变化,甚至改变联络线的功率传输方向。针对系统在 DFIG 风电场和 SOFC 电站接入区域 1,出力分别为 30、100 MW 的条件下,通过改变同步发电机出力,分析联络线传输功率的改变对互联系统阻尼比的影响。

当联络线传输功率从 306 MW 依次增大为 400、493、585、675 MW 时,系统振荡模式阻尼比的变化情况如图 9 所示,可以看出,随着联络线上传输功率从 306 MW 增大到 675 MW,模式 1 的阻尼比

呈现不断减小的趋势,模式 2 的阻尼比逐渐增大;模式 3 和模式 4 的阻尼比则不断减小。

假设母线 7 上的负荷在 1.00~1.05 s 期间向上波动 10%,仿真时间设置为 20 s,系统频率为 50 Hz。图 10 给出不同联络线传输功率下发电机 G1、G2 的功角、发电机 G3 的输出有功功率和节点 7 的电压幅值时域仿真图。可以看出,随着联络线传输功率的增大,发电机 G1、G2 的功角有所增大,稳定时间延长,发电机 G3 的输出有功功率值和振荡幅度均增大,节点 7 的电压曲线振荡幅度逐渐增大,电压幅值逐渐减小。

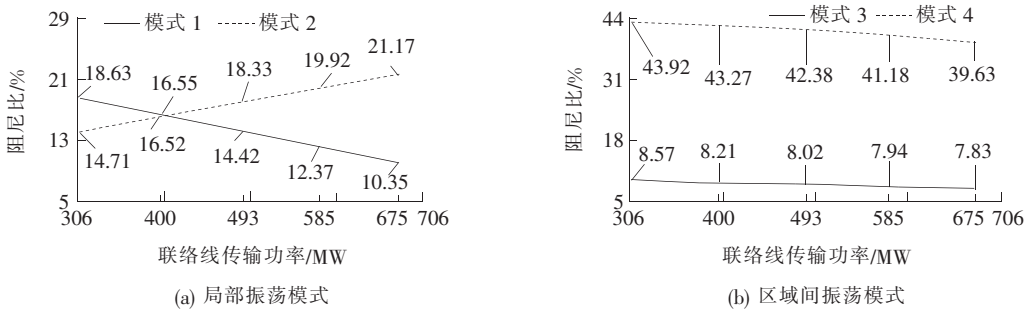


图 9 阻尼比随联络线传输功率变化情况

Figure 9 The variation of damping ratio under different transmission power of line

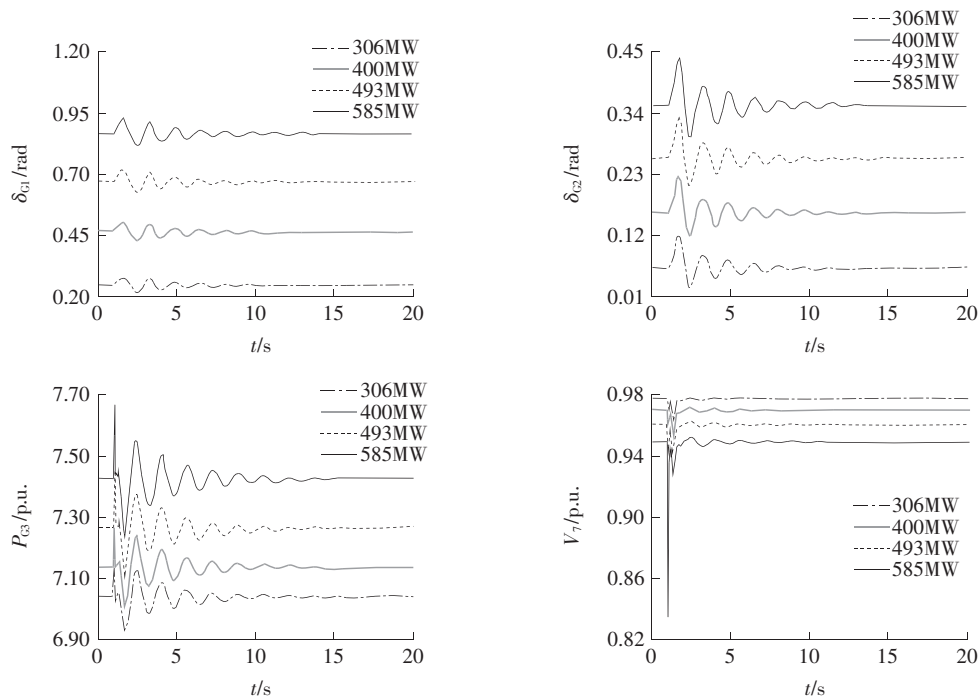


图 10 阻尼比随联络线传输功率变化情况

Figure 10 The variation of damping ratio under different transmission power of line

4 结语

为探究含风电和固体氧化物燃料电池的综合能源系统对互联电力系统的阻尼特性影响问题,该文基于 DFIG 和 SOFC 发电系统模型,构建了含 DFIG 和 SOFC 的电力系统小干扰分析模型,以 IEEE 四机两区域系统为例对二者的容量配比、接入方式及系统联络线传输功率的变化对系统阻尼特性的影响进行分析,结果表明:

1)在不同容量配比下,受 DFIG 和 SOFC 共同作用的影响,DFIG 和 SOFC 的接入会增大系统阻尼比,改善系统的稳定性,且随着二者容量的增大,改善作用更加显著;

2)DFIG 和 SOFC 同时接入送电侧或分别接入送电侧和受电侧时,2 种接入方式均能增大系统的阻尼比,提高系统稳定性,相比较均接入送电侧的效果更好;

3)随着联络线传输功率的增大,区域内和区域间的振荡模式阻尼比会受到不同程度不同趋势的影响,但系统整体稳定性变差。

参考文献:

[1] 李宏仲,房宇娇,肖宝辉.考虑广义储能的区域综合能源

系统优化运行研究[J].电网技术,2019,43(9):3130-3138.

LI Hongzhong, FANG Yujiao, XIAO Baohui. Research on optimized operation of regional integrated energy system considering generalized energy storage[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3130-3138.

[2] 杨经纬,张宁,王毅,等.面向可再生能源消纳的多能源系统:述评与展望[J].电力系统自动化,2018,42(4):11-24.

YANG Jingwei, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Multi-energy system towards renewable energy accommodation: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 11-24.

[3] 宫飞翔,李德智,田世明,等.综合能源系统关键技术综述与展望[J].可再生能源,2019,37(8):1229-1235.

GONG Feixiang, LI Dezhi, TIAN Shiming, et al. Review and prospect of core technologies of integrated energy system[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(8): 1229-1235.

[4] 和萍,武欣欣,陈婕,等.含风电和光伏发电的综合能源系统的低频振荡[J].电力科学与技术学报,2019,34(1):20-27.

HE Ping, WU Xinxin, CHEN Jie, et al. Low frequency oscillation of an integrated energy system with wind and

- solar power generation[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2019, 34(1): 20-27.
- [5] HE Ping, WEN Fushuan, Ledwich G, et al. An investigation on interarea mode oscillations of interconnected power systems with integrated wind farms[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2016, 78: 148-157.
- [6] DU Wenjuan, WANG Haifeng, CAI Hui. Modelling a grid-connected SOFC power plant into power systems for small-signal stability analysis and control[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2012, 23(3): 330-341.
- [7] WANG Li, CHANG Chehao, KUAN Binglin, et al. Stability improvement of a two-area power system connected with an integrated onshore and offshore wind farm using a STATCOM[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, 53(2): 867-877.
- [8] DU Wenjuan, WANG Haifeng, ZHANG Xiaofeng, et al. Effect of grid-connected FC generation on power system oscillation damping[C]//2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. Nangjing, China: IEEE, 2009.
- [9] Bhushan R, Chatterjee K. Effects of parameter variation in DFIG-based grid connected system with a FACTS device for small-signal stability analysis [J]. *IET Generation, Transmission&Distribution*, 2017, 11(11): 2762-2777.
- [10] 王帅飞, 王维庆, 康智, 等. 利用网架拓扑结构提高大规模风电并网稳定性[J]. *水力发电*, 2019, 45(9): 130-134.
- WANG Shuaifei, WANG Weiqing, KANG Zhi, et al. Improving the stability of large-scale wind grid with grid topology[J]. *Water Power*, 2019, 45(9): 130-134.
- [11] Sedghisigarchi K, Feliachi A. Control of grid-connected Fuel Cell power plant for transient stability enhancement [C]//2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 02CH37309). New York, USA: IEEE, 2002.
- [12] WU Guiying, SUN Li, Lee K Y. Disturbance rejection control of a fuel cell power plant in a grid-connected system[J]. *Control Engineering Practice*, 2017, 60: 183-192.
- [13] Taher S A, Mansouri S. Optimal PI controller design for active power in grid-connected SOFC DG system [J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2014, 60: 268-274.
- [14] Farooque M, Maru H C. Fuel cells-the clean and efficient power generators[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2001, 89(12): 1819-1829.
- [15] Li Y H, Rajakaruna S, Choi S S. Control of a solid oxide fuel cell power plant in a grid-connected system [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion* Jun, 2007, 22(2): 405-413.
- [16] Sedghisigarchi K, Feliachi A. Dynamic and transient analysis of power distribution systems with fuel cells- Part I: Fuel-cell dynamic model[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004, 19(2): 423-428.
- [17] 谭勋琼. 直驱永磁风电-燃料电池混合系统建模及功率平滑控制[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [18] 李自明, 姚秀萍, 王海云, 等. 不同风电机组并网对电力系统暂态电压稳定性的影响[J]. *电力科学与技术学报*, 2016, 31(2): 16-21.
- LI Ziming, YAO Xiuping, WANG Haiyun, et al. Influence of different wind turbine generators integration to power system transient voltage stability[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2016, 31(2): 16-21.
- [19] Gebregergis A, Pillay P, Bhattacharyya D, et al. Solid oxide fuel cell modeling[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(1): 139-148.
- [20] Ghanavati G, Esmaeili S. Dynamic simulation of a wind fuel cell hybrid power generation system [C]//2009 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference. Nangjing, China: IEEE, 2009.
- [21] Kundur P. *Power system stability and control* [M]. New York, McGraw-Hill Inc, 1994.