

交流输电线路的能量存储机制及其参与电力系统动态过程的角色

徐秋朦^{1,2}, 王思成^{1,2}, 袁小明^{1,2}

(1. 强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学), 武汉 430074; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074)

摘要: 交流输电线路作为电力系统的重要组成部分, 对系统振荡的能量交换过程具有关键影响, 尤其是在当前新能源发电设备内电势动态的时间尺度与输电线路动态水平相当的普遍场景下, 交流输电线路动态特性将深度参与系统振荡的能量交换过程。因此, 探究交流输电线路的能量存储机制及其参与系统振荡能量交换过程的基本方式对厘清系统振荡的物理机制具有重要的奠基意义。然而, 现有研究大多聚焦于基于电压、电流瞬时值或谐波间关系的交流输电线路数学表征, 缺乏对线路如何参与系统振荡能量交换过程的物理认识, 相应的新能源电力系统振荡机理仍不明确。以典型变换器并网交流系统为例, 首先阐明了系统电能平稳传输目标要求下交流输电线路的基本运行原理, 接着建立了表征交流输电线路动态的解析关系, 进而分析了交流输电线路的动态特征及能量存储内涵, 最后深入剖析了系统闭环动态的能量交换行为, 深化了对交流输电线路参与系统动态过程内在方式的理解, 为揭示当前系统振荡的能量交换一般机理奠定了重要的认知基础。

关键词: 交流网络; 输电线路; 系统振荡; 能量交换; 动态分析

Energy Storage Mechanism of AC Transmission Line and Its Role in Dynamic Process of Power Systems

XU Qiumeng^{1,2}, WANG Sicheng^{1,2}, YUAN Xiaoming^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: As a crucial component of power systems, AC transmission lines play a pivotal role in the energy exchange process during system oscillations, especially in prevalent scenarios where the time-scale dynamics of internal potentials in new energy generation equipment are comparable to those of transmission lines. Under such conditions, the dynamic characteristics of AC transmission lines will profoundly participate in the energy exchange process of system oscillations. Therefore, investigating the energy storage mechanism of AC transmission lines and their fundamental modes of involvement in the energy exchange of system oscillations hold foundational significance for clarifying the physical mechanisms behind these oscillations. However, existing researches have predominantly focused on mathematical characterizations of AC transmission lines based on instantaneous voltage and current values or harmonic relationships, lacking a physical understanding of how transmission lines participate in the energy exchange process of system oscillations. Consequently, the oscillation mechanisms in new energy power systems remain unclear. Firstly, a typical converter-interfaced AC system is taken as an example, the basic operational principles of AC transmission lines is elucidated under the objective of stable power transmission. Secondly, the analytical relationships characterizing the dynamics of AC transmission lines is established. Thirdly, their dynamic characteristics and energy storage implications are analyzed. Finally, a detailed examination of the energy exchange behavior in closed-loop system dynamics is conducted, deepening the understanding of how AC transmission lines intrinsically participate in system dynamic processes and laying a vital cognitive foundation for revealing the general energy exchange mechanisms underlying current system oscillations.

Key words: AC network; transmission lines; system oscillations; energy exchange; dynamic analysis

0 引言

近年来,随着新能源大规模并网,电力系统中与该背景相关的系统振荡问题频发,振荡机理仍未完全明晰,系统稳定正面临严峻挑战^[1-6]。系统振荡本质上是系统动态过程中,能量存储元件间有功与无功功率交换所驱动的一种动态演化行为。电力设备与交流输电线路作为承载有功、无功功率产生、转换、传输等核心功能的电力系统关键能量存储元件,其动态特性是决定系统振荡这一能量交换行为的重要因素。厘清设备与线路在有功、无功功率交换动态过程中的能量存储机制,明确其参与系统有功、无功功率交换动态过程的基本方式,是研究设备与线路动态特性,进而揭示系统振荡能量交换一般机理的基础性工作^[7-8]。

目前,已有研究针对同步/异步发电机、风力发电机等各类电力设备的能量存储机制展开深入探讨,构建了基于有功/无功功率不平衡激励与内电势幅值/频率响应关系的设备能量存储机制统一表征方法,揭示了交流电流-电压瞬时值关系所描述的电路/控制连接结构表象下,设备参与系统有功/无功功率交换动态过程的内在模式^[9-13]。然而,关于系统有功/无功功率交换动态过程中交流输电线路的能量存储机制及其参与系统动态的内在方式,相关研究仍较为匮乏,亟待进一步开展。尤其在当前系统场景下,新能源发电设备内电势动态的时间尺度与线路动态水平基本相当,线路动态将深度参与系统振荡的能量交换过程,因此更需深入研究线路能量存储机制,明确其在系统有功/无功功率交换动态过程中的角色^[7]。

现有针对系统振荡问题的交流线路研究,普遍聚焦于面向解析分析的线路数学关系构建。根据对交流信号的认知与表征方式不同,可分为基于准稳态假定的交流线路关系,以及考虑非正弦稳态交流电压激励下的交流线路关系两类。在研究以传统同步电机为主体的电力系统稳定问题时,由于同步电机转子时间尺度较大(约秒级),依据准稳态假定,电

压、电流可近似用幅值与频率恒定的正弦波相量表征^[12],此时交流线路关系表现为电压、电流相量间基于工频阻抗的代数关系^[15-16]。

随着新能源发电设备的接入,早期学者重点关注其对机电时间尺度(约秒级)动态过程的影响:文献[17-18]探讨了新能源接入比例的影响,文献[19-20]分析了新能源接入位置的影响。进一步地,考虑到新能源设备内部直流电容存在快速动态特性,学者们开始着眼于直流电压时间尺度(约100毫秒级)的动态问题研究^[21-22]。然而,在上述动态问题研究中,多数研究仍假设设备输出电压的变化足够缓慢,满足准稳态假定,因此交流线路普遍沿用工频阻抗关系。不过,也有文献指出,弱网场景下传统准稳态假定的成立性存疑^[23],这为交流线路工频阻抗关系的适用边界敲响了警钟,学界由此开始考虑非正弦稳态电压激励下的交流线路关系。

为避免并网变换器因过流烧毁晶闸管,以电流控制为代表的快尺度内环控制在新能源发电设备中被广泛采用。受该快尺度控制影响,设备端口内电势呈现快尺度动态特性(时间尺度约为10 ms),此时准稳态假定不再成立。文献[24]提出了非正弦稳态变化的电压与电流可通过工频正弦波叠加正、负序谐波分量的形式描述,并据此构建了交流线路的 2×2 谐波阻抗关系。文献[25-27]则进一步指出,需在基波基础上叠加更多次谐波以完善描述。此外,部分研究通过坐标变换将电压、电流瞬时值转换为同步速旋转坐标系下的 dq 电气量,并基于此建立线路数学关系^[28-30]。但需注意的是,坐标变换本质上是参考系的转变, dq 电气量仍为旋转坐标系下的交流瞬时值,其数学关系本质上仍描述谐波关系^[7]。

由于准稳态假定或谐波近似下交流线路同一相电压与电流的瞬时值波形相位差角度固定,无法反映有功/无功功率的变化,也就难以客观体现交流线路在系统振荡中参与能量交换的本质。因此,现有研究多聚焦于基于电压电流瞬时值或谐波间关系的交流输电线路数学表征,对线路如何参与系统有功/无功功率交换动态过程的物理认识较为缺乏,相应的新能源电力系统中设备与网络间有功/无功功率交换驱动系统振荡的一般机理仍不明确。本文从变换器设备连续调制内电势幅值与频率角度出发^[7, 31],分析了系统有功/无功功率交换动态过程

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U23B6008);台达电力电子科教发展计划资助项目(DREN2024001)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (U23B6008); the Delta Power Electronics Science and Education Development Program (DREN2024001).

中交流输电线路的能量存储机制, 阐述了其参与系统动态的基本方式, 为揭示系统振荡的能量交换一般机理奠定了重要基础。

1 变换器并网系统基本结构与运行原理

新型电力系统动态分析的核心基础在于对变换器并网交流系统动态过程的认知。典型变换器并网交流系统的基本结构如图 1 所示。图 1 中, e_{abc} 、 i_{abc} 、 u_{tabc} 、 u_{gabc} 分别代表三相内电势、电流、端电压及无穷大电源电压的瞬时值, 其旋转矢量形式分别为 E 、 I 、 U_i 、 U_g ; $e_{\alpha\beta}$ 、 $i_{\alpha\beta}$ 、 $u_{\alpha\beta}$ 分别为静止两相坐标系下内电势、电流、端电压的瞬时值; ω_p 为锁相坐标系的旋转角速度, θ_p 为锁相相位; e_d^p/e_q^p 、 i_d^p/i_q^p 分别为锁相坐标系下旋转两相内电势、端电压、电流的瞬时值; i_{dref}^p/i_{qref}^p 为电流控制环节的电流指令, u_{dc} 和 u_{dcr} 分别为直流母线电压及其指令, u_t/u_{tr} 为端电压幅值及其指令。 L_f 为滤波电感, L_g 为线路电感。PLL 即锁相控制环, ACC 为交流电流控制环, DVC 为直流电压控制环, PI 为控制器, PCC 为公共并网点, PWM 为脉宽调制信号。

i_d^p/i_q^p 分别为锁相坐标系下旋转两相内电势、端电压、电流的瞬时值; i_{dref}^p/i_{qref}^p 为电流控制环节的电流指令, u_{dc} 和 u_{dcr} 分别为直流母线电压及其指令, u_t/u_{tr} 为端电压幅值及其指令。 L_f 为滤波电感, L_g 为线路电感。PLL 即锁相控制环, ACC 为交流电流控制环, DVC 为直流电压控制环, PI 为控制器, PCC 为公共并网点, PWM 为脉宽调制信号。

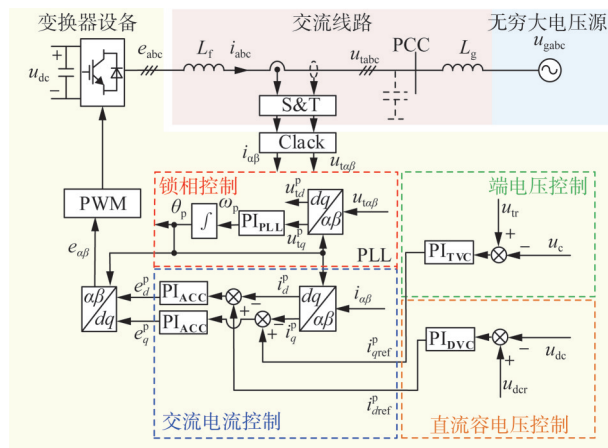


图 1 变换器并网系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the converter grid-connected system

图 1 中的变换器设备重点关注与内电势幅值及频率快尺度动态密切相关的电流控制。该变换器设备假定机侧输入的 P_m 保持恒定; 电流控制中 dq 两个通道的 PI 控制参数相同, 且忽略电流交叉耦合与端电压前馈; 不考虑晶闸管的开关过程, 认为变换器设备端口处的实际内电势与控制输出的内电势一致; 不设置滤波电容, 认为变换器直接通过滤波电

感与弱电网相连。同时忽略线路电阻损耗, 交流线路采用三相电感进行等值表示。系统闭环运行的原理示意图如图 2 所示。

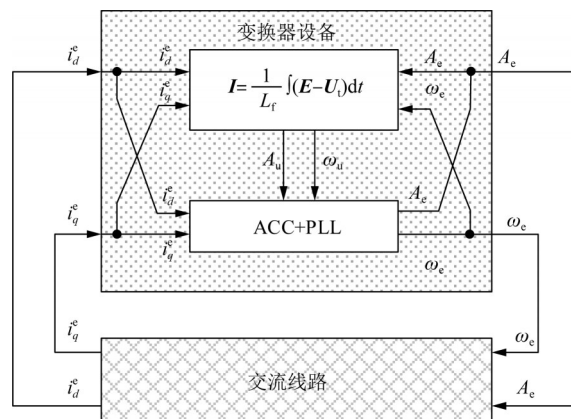


图 2 系统闭环运行原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of system closed-loop operation

电力系统需在确保电压幅值与频率稳定的前提下, 向用电侧实时供给有功与无功功率。变换器设备的功能是建立节点电压的幅值与频率, 并提供系统所需的有功与无功功率; 交流线路则在变换器设备端口所建立的稳定内电势幅值与频率 (A_v/ω_v) 水平下, 依托输电线路稳定地传送和分配有功与无功功率。当系统稳定运行时, 设备端口的内电势幅值与频率, 以及反映有功与无功功率的有功电流 i_d^p 和无功电流 i_q^p 均为直流常量。

但在系统动态过程中, 系统的电压幅值与频率不再稳定。受变换器设备控制环节、物理器件工作特性等复杂约束的影响, 各处电压幅值与频率均会偏离稳态工作点并发生动态演化。当交流线路感知到各变换器设备端口内电势的幅值与频率变化后, 电感两端的电压差随之改变; 在电感的约束下, 流过交流线路的有功与无功电流也会相应调整。变换器设备检测到有功与无功电流的变化后, 在滤波电感的约束下, 并网点端电压的幅值与频率 (Δ_v/ω_v) 发生改变, 进而触发锁相环动作以调整锁相频率。锁相坐标系的相位随锁相频率的时变积分而变化, 由此产生新的电流误差, 电流控制环节随即动作, 更新变换器设备端口输出的内电势幅值与频率, 形成闭环, 如图 2 所示。值得注意的是, 在变换器设备运行过程中, 将检测到的端电压和电流作为输入, 与在变换器设备基本运行原理中把有功与无功电流

视为唯一激励, 这两者并不矛盾。因为端电压和电流都是交流线路在内电势激励下产生的唯一响应结果, 且从图2可看出端电压由电流和内电势共同决定, 因此端电压所包含的信息均可通过电流反映出来^[9-13]。

综上, 研究系统动态应重点关注内电势的幅值与频率、有功与无功电流这两类状态量。具体而言, 可通过分析有功与无功电流激励下变换器设备端口的内电势幅值与频率响应, 掌握变换器设备的基本运行原理; 同时, 通过分析内电势幅值与频率激励下交流线路的有功与无功电流响应, 掌握交流线路的基本运行原理。这一过程形成天然闭环, 能够揭示系统内电势幅值、频率与有功、无功电流之间的闭环运行原理。

2 交流线路动态特征分析

2.1 交流线路原始关系

在上述激励响应端口的认知下, 交流线路的基本工作可划分为3个环节, 依次为振荡器环节、电感积分环节和投影环节, 如图3所示。需要注意的是, 由于内电势是作为变换器设备接入交流线路的端口, 因此交流线路部分会包含滤波电感, 将其统称为线路总电感, 即 $L_{eq} = L_f + L_g$, 也可简称为线路电感。

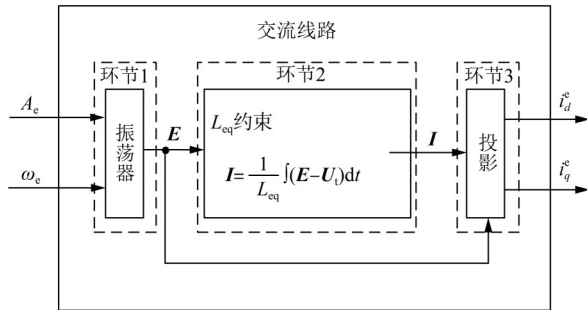


图3 交流线路激励响应基本运行原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the open-loop operation principle of AC line excitation response

结合交流线路基本工作环节与图4所示的旋转矢量关系图, 线路在设备内电势 E 和无穷大电源电压 U_g 激励下形成的电流 I 可以表示为:

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{L_{eq}} \int (E - U_g) dt \\ &= \frac{1}{L_{eq}} \int \left(A_e e^{j(\omega_e t + \varphi_{e0})} - A_g e^{j(\omega_g t + \varphi_{g0})} \right) dt \end{aligned} \quad (1)$$

式中: 设备内电势 E 和无穷大电源电压 U_g 均采用由幅值、频率及初相位共同决定的复指数函数进行解析表示; φ_{e0} 为设备内电势的初相位; A_g 、 ω_g 、 φ_{g0} 分别为无穷大电压源的电压幅值、频率与初相位, 且三者均为定值; A_e 、 ω_e 、 φ_{e0} 分别为设备内电势的幅值、频率与初相位。

此外, 由于本文重点关注电感的动态特性, 式中省略了电流初值的影响, 积分运算也以不定积分形式呈现。鉴于式中涉及对时变幅值与频率的内电势的积分运算, 其原函数无法通过初等函数及其有限次运算进行解析表示, 因此对等式右侧进行重复分部积分, 展开后可得无穷项级数求和表达式^[5], 整理如下。

$$\begin{cases} I = -jI_{e_Lcq}^1 e^{j\theta_e} + I_{e_Lcq}^2 e^{j\theta_e} + jI_{e_Lcq}^3 e^{j\theta_e} - \dots + jI_{g_Lcq} e^{j\theta_g} \\ = \sum_{k=1}^{+\infty} \left(-I_{e_Lcq}^k e^{j\left(\theta_e + \frac{k\pi}{2}\right)} \right) + jI_{g_Lcq} e^{j\theta_g} \\ I_{e_Lcq}^1 = \frac{A_e}{\omega_e L_{eq}}, k=1 \\ I_{e_Lcq}^k = \frac{\left(I_{e_Lcq}^{k-1}\right)'}{\omega_e}, k \geq 2 \\ I_{g_Lcq} = \frac{A_g}{\omega_g L_{eq}} \\ \theta_e = \int \omega_e dt + \varphi_{e0}, \theta_g = \omega_g t + \varphi_{g0} \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_{g_Lcq} 为无穷大电压源在总电感约束下所得的电流分量幅值; $I_{e_Lcq}^k$ 为内电势在电感总约束下产生的各项电流分量幅值, 上标 k 表示无穷级数电流分量的项数; $\left(I_{e_Lcq}^{k-1}\right)'$ 表示对 $I_{e_Lcq}^{k-1}$ 进行时间求导; θ_e 和 θ_g 分别为设备内电势和无穷大电源电压的相位。

图4为旋转矢量关系图。

根据电感物理约束求得电流 I 之后, 需要将 I 在设备内电势 E 上投影得到设备端口的有功电流 i_d^c 和无功电流 i_q^c 。即将电流 I 转换到内电势旋转坐标系 dq^c 中, 结合图4中绿色三角形所示的投影关系, 根据式(2)即可得到设备端口有功电流 i_d^c 、无功电流 i_q^c 的表达式。

$$\begin{cases} i_d^c + j i_q^c = I e^{-j\theta_e} \\ i_d^c = \sum_{n=1}^{+\infty} \left((-1)^{n+1} I_{e_Lcq}^{2n} \right) - I_{g_Lcq} \sin(\theta_g - \theta_e) \\ i_q^c = \sum_{n=0}^{+\infty} \left((-1)^{n+1} I_{e_Lcq}^{2n+1} \right) + I_{g_Lcq} \cos(\theta_g - \theta_e) \end{cases} \quad (3)$$

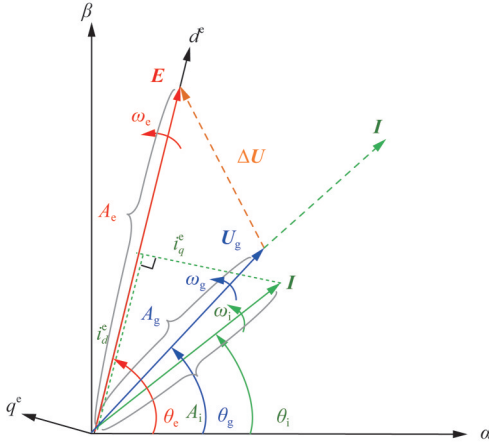


图 4 旋转矢量关系图

Fig. 4 Rotation vector relationship diagram

式中 n 为对无穷级数电流奇数项或偶数项的编号, 取自然数。

式(3)即为线路电感约束下内电势幅值/频率激励与有功/无功电流响应之间的原始高阶非线性数学关系, 该关系中动态项的作用程度反映了其动态特征。无穷级数关系中动态项的作用越强, 关系的动态特征就越明显, 此时交流线路对系统振荡风险的影响越大, 反之亦然。

2.2 交流线路关系动态特征解析分析

交流线路关系中的动态项主要是由交流电感一侧幅值/频率时变的内电势电压源产生的。模拟系统闭环动态时的内电势幅值/频率信号作为激励, 以单一模态的振荡频率为例, 假定在稳定工作时 A_e 、 ω_e 的直流常量上存在 ω_m 的小扰动振荡, 此时 A_e 、 ω_e 可以表示为:

$$\begin{cases} A_e = A_{e0} + \Delta A_e = A_{e0} + h_{\Delta A_e} \cos(\omega_m t + \varphi_{\Delta A_e}) \\ \omega_e = \omega_{e0} + \Delta \omega_e = \omega_{e0} + h_{\Delta \omega_e} \cos(\omega_m t + \varphi_{\Delta \omega_e}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: A_{e0} 、 ω_{e0} 分别为系统稳定工作时内电势幅值/频率直流量; ΔA_e 、 $\Delta \omega_e$ 分别为内电势幅值/频率直流量上的小扰动增量; $h_{\Delta A_e}$ 、 $h_{\Delta \omega_e}$ 分别为内电势幅值/频率的振荡幅值; ω_m 为内电势和电流的振荡频率, 后文简述为系统振荡频率; $\varphi_{\Delta A_e}$ 、 $\varphi_{\Delta \omega_e}$ 分别为内电势幅值/频率小扰动增量的初相位。

根据式(2)的递推关系可推导得到各阶动态项。由于动态项的递推关系为嵌套求导的特殊形式, 展开过程复杂, 且难以直接分析其在电感关系中的作用程度。因此考虑提取相近的公因式, 通过分析各动态项提取公因式后的系数部分, 具体表示如下。

$$\begin{cases} I_{e_Leq}^2 = \left(\frac{\omega_m}{\omega_e} \right) I_{e_Leq_base}^2 \approx \left(\frac{\omega_m}{\omega_{e0}} \right) I_{e_Leq_base} \\ I_{e_Leq}^3 = \left(\frac{\omega_m}{\omega_e} \right)^2 I_{e_Leq_base}^3 \approx \left(\frac{\omega_m}{\omega_{e0}} \right)^2 I_{e_Leq_base} \\ \vdots \\ I_{e_Leq}^k = \left(\frac{\omega_m}{\omega_e} \right)^{k-1} I_{e_Leq_base}^k \approx \left(\frac{\omega_m}{\omega_{e0}} \right)^{k-1} I_{e_Leq_base} \\ \vdots \end{cases} \quad (5)$$

式中 $I_{e_Leq_base}$ 为电流各动态项的公因式。

考虑到 A_e 、 ω_e 与 $h_{\Delta A_e}$ 、 $h_{\Delta \omega_e}$ 分别为同一数量级, 分子里低次项的影响后续可忽略, 考虑每个动态项均会出现影响程度最强的极端情况, 将式(5)中的 $I_{e_Leq_base}^k$ 统一为 $I_{e_Leq_base}$, 因此最终化简所得的统一基准公式 $I_{e_Leq_base}$ 为:

$$I_{e_Leq_base} = \frac{h_{\Delta A_e} + h_{\Delta \omega_e}}{\omega_{e0} L_{eq}} \quad (6)$$

后续忽略微小扰动, 将 A_e 、 ω_e 近似为 A_{e0} 、 ω_{e0} , 此时 $I_{e_Leq}^k$ 的影响程度与提取 $I_{e_Leq_base}$ 前的系数部分相关, 该系数可近似为 ω_m 与稳态内电势频率 ω_{e0} 比值的 $(k-1)$ 次方。当 ω_m 较小时, 系数中的比值较小, 高阶动态项系数的下降速率更快, 交流线路关系中高阶动态项的作用更不明显, 此时关系动态特征所反映的交流线路阶数也就越低, 对应的交流线路对系统振荡风险的影响越小; 反之, 交流线路关系所反映的动态特征越显著, 对应的交流线路阶数越高, 交流线路对系统振荡风险的影响越大, 此时系统振荡风险会更高。

2.3 交流线路关系动态特征仿真验证

为验证上述分析, 在 MATLAB/Simulink 中进行交流线路开环仿真验证, 设置参数如下: $A_{e0} = 500$ kV, $\omega_{e0} = 100\pi$ rad/s, $h_{\Delta A_e} = 0.02 A_{e0}$, $h_{\Delta \omega_e} = 0.006\omega_{e0}$ 。设置 ω_m 由低到高, 分别记作案例 $a(6\pi$ rad/s)、 $b(18\pi$ rad/s)、 $c(32\pi$ rad/s)、 $d(52\pi$ rad/s), 为验证交流线路关系的高阶动态项受 ω_m 大小的影响程度, 即不同振荡情况时交流线路动态特征。由于电流表达式由代数项与无穷个高阶动态项组成, 重点关注在不同 ω_m 的 A_e 、 ω_e 激励下的前三项电流分量的幅度 $I_{e_Leq}^1$ 、 $I_{e_Leq}^2$ 、 $I_{e_Leq}^3$ 波形变化情况, 如图 5 所示。

根据图 5 的波形可以发现, 前三项电流分量随 ω_m 的增加, 其波形也呈现出了规律性的变化: 动态项对应电流分量波形的稳定工作点均为 0, 即系统

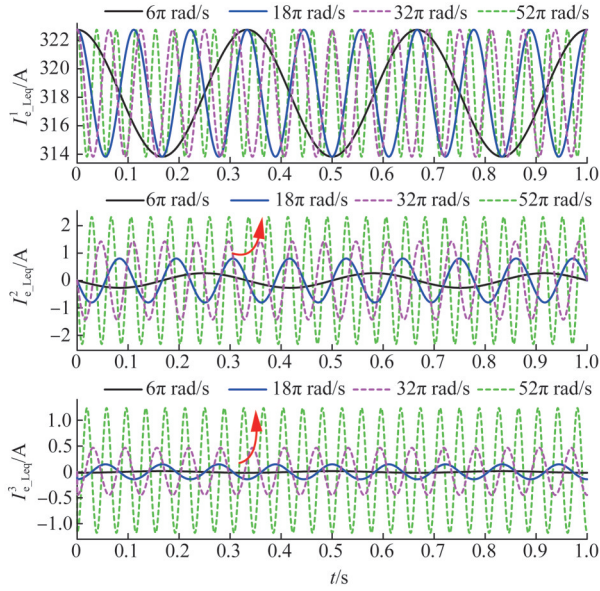


图5 在不同振荡频率的内电势幅值/频率激励下的前三项电流分量波形

Fig. 5 Waveforms of the first three current components under internal voltage amplitudes/frequencies excitation at different oscillation frequencies

稳定工作时高阶动态项关系不起作用; $I_{e_Leq}^1$ 、 $I_{e_Leq}^2$ 、 $I_{e_Leq}^3$ 的振荡频率均为 ω_m ; 随着激励的 ω_m 增大, $I_{e_Leq}^1$ 的振荡幅值都不变, 但 $I_{e_Leq}^2$ 与 $I_{e_Leq}^3$ 的振荡幅值随 ω_m 增大也越大, 并且更高阶动态项对 ω_m 变化的灵敏度更高, 即 ω_m 越大交流线路关系动态特征越不能被忽略, 并且对应交流线路阶数会越高。因此, 当系统振荡频率较大时, 交流线路关系动态特征需要被关注, 可以认为此时交流线路用传统静态代数关系来描述已经不太合适了, 此时交流线路对应阶数更高, 对系统振荡风险的影响不可忽略, 即新能源设备内电势动态的时间尺度与线路动态水平相当时, 输电线路动态将深度参与系统振荡的能量交换过程。

此外, 以 ω_m 为 6π rad/s 为例, 有:

$$S_{net} = P_{net} + jQ_{net} = \mathbf{E} \cdot \bar{\mathbf{I}} - \mathbf{U}_g \cdot \bar{\mathbf{I}} \quad (7)$$

式中: S_{net} 为电感的复功率; P_{net} 、 Q_{net} 分别为电感的有功功率和无功功率; 顶标“-”表示共轭, 其中 $\bar{\mathbf{I}}$ 为电流共轭; $\mathbf{U}_g$ 为无穷大电源电压。

计算求得线路电感上的有功功率 P_{net} 、无功功率 Q_{net} 如图6所示。

值得注意的是, 此时感性交流线路上存在动态的有功/无功功率, 反映出线路电感并不是传统认

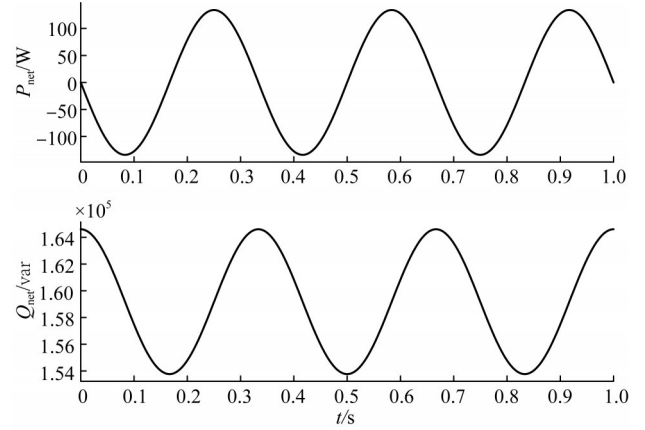


图6 交流线路上有功/无功功率波形

Fig. 6 Active/reactive power waveform on AC line

识中只作为一个无功负荷, 相反地, 还存在有功/无功能量的存储和释放。为了便于理解, 可以将变换器设备类比为一个受有功功率/无功功率两种性质能量驱动的质块, 交流线路类比为一个与其质量相当的受有功功率/无功功率两种性质能量驱动的质块, 一旦这个动力学系统受扰, 两个质块便会不断发生有功功率/无功功率两种性质能量的交换, 从而导致系统持续振荡。

3 交流线路能量存储机制

在上述仿真分析中, 发现了交流线路上存在有功功率/无功功率的动态这一特殊的现象, 本章将基于此认识, 进一步建立电感运动方程以揭示交流线路的能量存储机制。

3.1 电感运动机制

对于电感输电线路而言, 在系统稳态运行时, 线路电感两侧的电压差矢量 $\Delta \mathbf{U} = \mathbf{E} - \mathbf{U}_g$ 与电流矢量 $\mathbf{I}$ 应该是相位相差 90° 的关系, 即电感两侧的 $\Delta \mathbf{U}$ 和 $\mathbf{I}$ 时刻保持互相垂直。但是在系统动态过程中, $\Delta \mathbf{U}$ 与 $\mathbf{I}$ 会出现非 90° 的相位差, 此时电压差在电流旋转矢量上出现同相、正交投影 Δu_d^i 、 Δu_q^i (式中上标 i 表示电流旋转坐标系), 即对应前文所述的动态过程中交流线路上的有功功率/无功功率, 这一投影将驱动电感输出的电流幅值 A_i 、频率 ω_i 变化, 进而影响各设备并网端口的有功/无功功率或电流以更新设备内电势, 如此不断闭环调整, 直至 $\Delta \mathbf{U}$ 与 $\mathbf{I}$ 恢复相位差 90° , 如图7所示。故动态逐步趋向稳态过程的运行约束就是 $\Delta \mathbf{U}$ 与 $\mathbf{I}$ 调整相位差恢复并保持 90° 。

表1 代数、动态关系类比基础物理元件对应的能量内涵

Tab. 1 Algebraic and dynamic relationship analogies correspond to the energy connotations of basic physical components

基本电路元件	电阻	电感
物理模型		
能量内涵	能量损耗	能量存储
时域表达式	$\begin{cases} i(t) = \frac{1}{R} u(t) \\ x = u(t) \\ y = i(t) \end{cases}$	$\begin{cases} i(t) = \frac{1}{L} \int u(t) dt \\ x = u(t) \\ y = i(t) \end{cases}$
数学表达	$y = \frac{1}{R} x$	$y = \frac{1}{L} \int x dt$
数学关系类型	代数关系	积分关系
复频域关系	$Y(s) = \frac{1}{R} X(s)$	$Y(s) = \frac{1}{sL} X(s)$
传递函数框图		
环节类型	P 环节	I 环节

认识: 代数关系的作用类似于电阻在持续损耗能量; 微积分关系的作用类似于电感在动态存储或释放能量。由此可以厘清交流线路动态关系每项背后的能量损耗、存储的物理内涵, 故作用在交流线路上的有功功率 P_{net} 、无功功率 Q_{net} 可以被进一步分为有功功率损耗 $P_{\text{net_loss}}$ 、无功功率损耗 $Q_{\text{net_loss}}$, 以及有功功率存储 $P_{\text{net_storage}}$ 和无功功率存储 $Q_{\text{net_storage}}$ 。

根据旋转矢量之间的同相、正交关系与表达式中代数、动态关系, 交流线路上的功率可以表示为:

$$\begin{aligned}
 S_{\text{net}} &= P_{\text{net_loss}} + jQ_{\text{net_loss}} + P_{\text{net_storage}} + jQ_{\text{net_storage}} \\
 &= \underbrace{0}_{P_{\text{net_loss}}} + j \underbrace{A_{\Delta u} I_{\Delta u_Leq}^1}_{Q_{\text{net_loss}}} + \underbrace{A_{\Delta u} \sum_{k=0}^n (I_{\Delta u_Leq}^{4k+2} + I_{\Delta u_Leq}^{4k+4})}_{P_{\text{net_storage}}} + \\
 &\quad \underbrace{j A_{\Delta u} \sum_{k=1}^n (I_{\Delta u_Leq}^3 + I_{\Delta u_Leq}^{4k+1} + I_{\Delta u_Leq}^{4k+3})}_{Q_{\text{net_storage}}}
 \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11)可知, 在系统稳定运行时, 由于线路电感两端电压差的 $A_{\Delta u}/\omega_{\Delta u}$ 处在稳定工作点, 因此关系中的动态项不起作用, 此时线路电感只损耗无功, ΔU 与 I 垂直, 与传统认识一致。但是在系统动

态时, 由于线路电感两端电压差的幅值/频率 $A_{\Delta u}/\omega_{\Delta u}$ 会在稳定工作点上动态变化, 关系中的动态项起作用, 此时交流线路上的 ΔU 与 I 不为 90° 并且相角差会根据动态关系计算下得到的电流各项分量幅值的变化而改变, 交流线路存在能量存储行为, 能量存储方式如式(11)所示, 可以看出在系统动态时除了无功损耗外, 还存在有功功率和无功功率的存储。至此, 交流线路能量存储机制得到澄清, 可以实现对线路电感能量存储行为的分析。

系统动态过程中 ΔU 与 I 不垂直时, 交流线路存在能量存储行为, 即在有功/无功功率误差驱动下, 线路电感不断存储、释放能量, 调整能量水平。这与电感运动机制中在电感约束下 Δu_d^i 、 Δu_q^i 作为“变化的力”驱动“运动状态” A_i/ω_i 变化的认识是吻合的。 Δu_d^i 、 Δu_q^i 即反映了交流线路受到有功功率、无功功率作用, A_i 、 ω_i 的大小即反映了交流线路能量存储水平。至此, 电感运动机制及其背后的能量存储机制也得到了进一步澄清。

为验证上述分析, 在 MATLAB/Simulink 中进行交流线路的能量存储机制仿真验证, 并且设置交流线路环节的激励 $A_{\Delta u}$ 、 $\omega_{\Delta u}$ 均为在稳态工作点上叠加一个相同振荡频率的正弦扰动增量。以振荡频率为 $18\pi \text{ rad/s}$ 为例, 结合式(11), 得到作用于交流线路上的有功功率、无功功率与其具体流向存储、损耗的情况如图 10 所示。

可以发现, 当 $A_{\Delta u}$ 、 $\omega_{\Delta u}$ 在稳态工作点上的扰动呈正弦变化时, 作用在交流线路上的功率除了

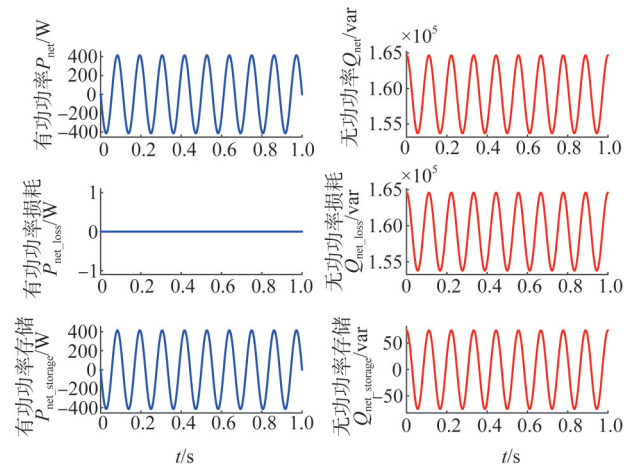


图10 交流线路上有功/无功功率存储、损耗波形

Fig. 10 Active/reactive power storages and loss waveforms on AC line

$P_{\text{net_loss}}$ 保持为 0, 其余还存在 $Q_{\text{net_loss}}$ 、 $P_{\text{net_storage}}$ 与 $Q_{\text{net_storage}}$ 。由于交流线路上的 $P_{\text{net_storage}}$ 与 $Q_{\text{net_storage}}$ 均不为 0, 可以证明交流线路在系统动态过程中会作为储能元件, 并且存在能量存储行为。

4 交流线路在系统动态过程的角色研究

本节针对变换器并网闭环交流系统, 首先结合前文研究得到的对变换器设备、交流线路作为储能元件的角色认识, 分析由变换器设备、交流线路所构成的系统闭环运行方式, 重点关注交流线路参与系统动态过程的机制; 接着, 基于第 3 节研究得到的交流线路动态特征及能量存储机制, 针对由变换器设备、交流线路构成的闭环系统, 仿真分析闭环视角下交流线路动态特征, 并验证变换器设备与交流线路之间存在能量交换行为; 最后, 分析了改变变换器设备控制参数、线路电感大小对交流线路动态特征、交流线路能量存储行为的影响。

4.1 交流线路参与系统动态过程研究

首先可以结合“不平衡力-物质-运动状态”视角下对变换器设备、线路电感运动方程的认识, 分析系统动态过程。由图 11 可以发现, 对于变换器设备, 有功/无功功率或电流误差作为两个维度的不平衡力驱动变换器设备运动, 改变内电势幅值/频率这两个维度上的运动状态, 这是由设备电路和控制方式天然形成的设备运动方程^[7-9]。对于交流线路, 如前一节所述, 实际储能元件受有功/无功电压误差作为两个维度的不平衡力使得电感中有功/无功累积水平发生变化, 从而改变电流幅值/频率这两个维度的运动状态, 反映了交流线路的运动方程。

在系统动态过程中, 当变换器设备端口输出的 A_c/ω_c , 即变换器设备的运动状态发生微小扰动, 此时变换器设备内电势 E 与无穷大电源电压 U_g 作差后得到 ΔU 的幅值 $A_{\Delta u}$ 、频率 $\omega_{\Delta u}$ 也出现相较于稳态的偏离。接着, 由幅值/频率时变的 U 在交流线路输出的 I 上投影, 得到两个维度变化的力 Δu_d^i 、 Δu_q^i 作用在线路电感上, 通过电感运动方程形成变化的两个维度运动状态 A_i 、 ω_i 。同样的, 由交流线路的运动状态 A_i 、 ω_i 合成的幅值/频率时变的 I 在变换器设备输出的 E 上投影, 得到作用在变换器设备上两个维度变化的力 i_d^c 、 i_q^c , 通过设备运动方程改变变换器设备输出的两个维度运动状态 A_c 、 ω_c 。由此可以

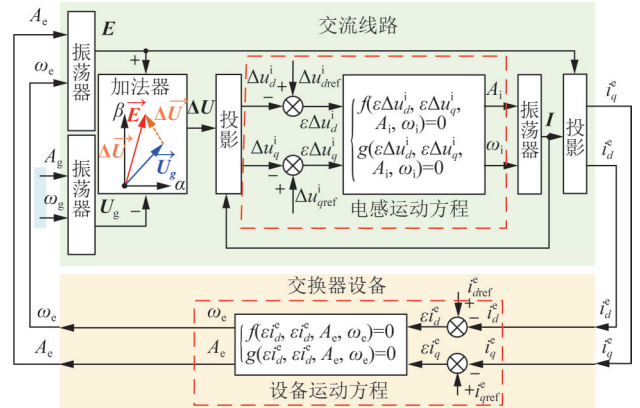


图 11 在“不平衡力-物质-运动状态”视角下变换器设备、交流线路的运动方程

Fig. 11 Motion equations of VSC and AC line from the perspective of "unbalanced force-matter-motion state"

发现, 在动态过程中, 变换器设备的运动状态改变会导致其施加在交流线路上的力变化, 进而影响交流线路的运动状态, 同时交流线路的运动状态改变也会导致其施加在变换器设备上的力变化, 进而影响变换器设备的运动状态。变换器设备和交流线路正是通过这样的物理作用路径从而实现相互作用。系统动态过程可以被重述为变换器设备与交流线路等储能元件通过“不平衡力”与“运动状态”相互作用, 不断调节演化的过程。

接下来结合仿真深化对变换器设备、交流线路运动方程约束下的系统动态过程的认识。在 MATLAB/Simulink 中进行系统闭环仿真, 设置变换器并网系统参数如下: 1) 基准值: 功率基准 $P_b=100 \text{ kW}$, 交流电压基准 $V_b=690 \text{ V}$, 角频率基准 $\omega_b=100 \pi \text{ rad/s}$, 直流电压基准 $V_{\text{dcb}}=1 \text{ 100 V}$; 2) 电路参数: $L_r=0.1 \text{ p. u.}$, $L_g=0.2 \text{ p. u.}$, $A_g=1 \text{ p. u.}$, $\omega_g=100\pi \text{ rad/s}$, $\varphi_{g0}=0 \text{ rad}$; 3) 控制参数: $i_{\text{dref}}^p=0.8 \text{ p. u.}$, $i_{\text{qref}}^p=0 \text{ p. u.}$, ACC: $k_{\text{pi}}=0.3$, $k_{\text{ii}}=160$, PLL: $k_{\text{pp}}=4.8$, $k_{\text{ip}}=3 \text{ 294}$ 。设置 $t=0.1 \text{ s}$ 时, 系统分别受到以下 3 种扰动: case1 锁相频率初值偏离其稳态运行点 0.5 rad/s ; case2 电流控制有功电流指令突增 0.1 p. u. , 以模拟功率突变扰动; case3 无穷大电源电压跌落 0.1 p. u. 。依次得到系统闭环动态过程中的 A_c 、 ω_c 、 Δu_d^i 、 Δu_q^i 、 A_i 、 ω_i 、 i_d^c 、 i_q^c 波形, 如图 12 所示。

图 12 中蓝色曲线示意“运动状态”, 红色曲线示意“变化的力”。可以看到, 在 3 种扰动场景下, 当 $t=0.1 \text{ s}$ 时系统出现扰动, 所有直流量偏离稳态

工作点时,此时变换器设备的运动状态 A_e 、 ω_e 出现扰动,使得作用在交流线路上的力 Δu_d^i 、 Δu_q^i 也随之变化。在变化的力作用下,交流线路上受力不平衡,通过电感运动方程形成变化的运动状态 A_i 、 ω_i 。相应地,交流线路运动状态的变化使得其作用在变换器设备上的力 i_d^e 、 i_q^e 变化,变换器设备受力也不再平衡,通过设备运动方程形成变化的运动状态 A_e 、 ω_e 。按照此因果逻辑,形成了变换器设备和交流线路在系统动态过程中的物理作用路径的认识,系统中物理量也按照这样的规律不断更新迭代,直至系统中的物理量恢复稳定状态,变换器设备、交流线路均受力平衡。

由上述分析可知,交流线路参与系统动态过程的机制如下:首先,线路两端的电压幅值与频率决定了线路上电压差的幅值与频率;随后,该电压差的幅值与频率在线路电流上的投影形成有功与无功电压差;接着,有功与无功电压差通过电感运动方程生成电流的幅值与频率;再将电流的幅值与频率投影到端口内电势上,形成有功与无功电流;最终,有功与无功电流与端口内电势相互作用,产生作用于设备的有功与无功功率。通过这种激励响应的运行原理,交流线路与设备运行原理形成闭环,进而参与系统动态过程。

根据3.2节的分析,运动方程背后蕴含着能量存储机制:物质受到不平衡力作用,本质上反映了其受到有功或无功功率误差的驱动;而物质运动状态的改变,实则对应着其能量水平的变化。基于这一结论,可进一步剖析系统动态过程背后的能量内涵。

4.2 系统动态过程中变换器设备、交流线路能量交换行为分析

本节基于第3节得出的交流线路动态特征及储能机制,针对由变换器设备与交流线路构成的闭环系统,分析系统动态过程中变换器设备与交流线路的能量交换行为,旨在说明上节所分析的交流线路参与系统动态过程的背后,对应的是设备与交流线路通过该闭环机制相互交换有功和无功两种性质的能量。

以case1扰动场景为例,内电势幅值/频率存在 ω_m 为57.12 rad/s的动态,根据2.2节的分析可知,交流线路关系中的动态项必然发挥了作用,并参与了输出电流中电流分量的形成。

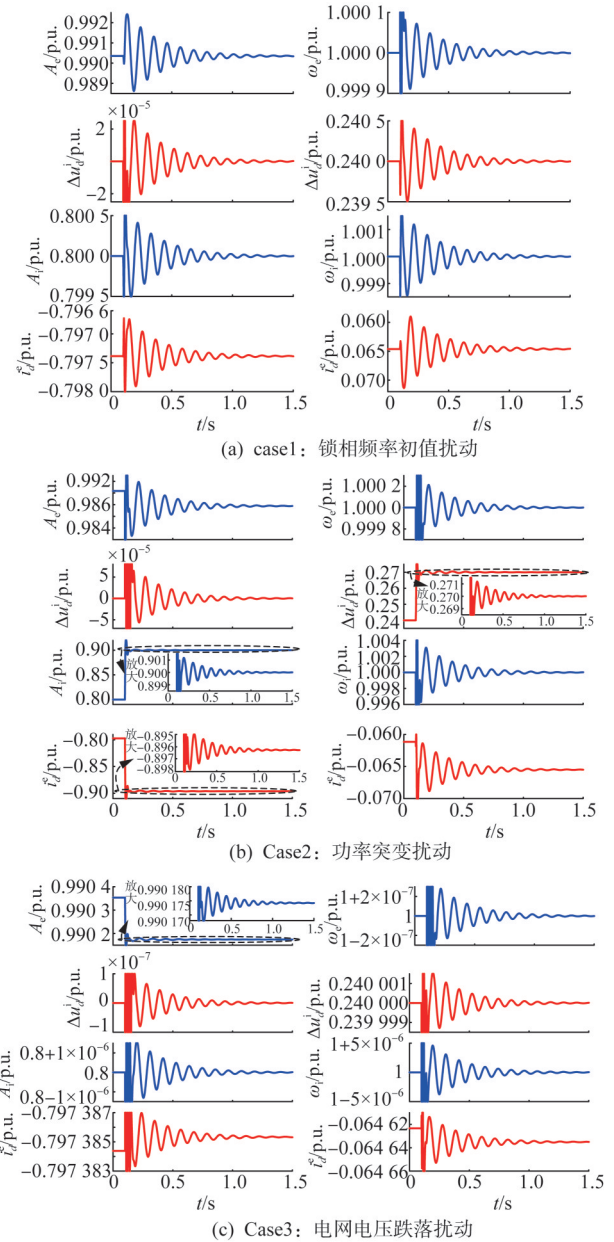


图12 变换器并网交流系统发生扰动后一系列物理量波形

Fig. 12 A series of physical waveforms after disturbances occur in the converter grid-tied system

首先,聚焦交流线路关系的动态特征,基于系统参数开展MATLAB/Simulink仿真,施加与4.1节case1场景相同的扰动,得到闭环仿真中由交流线路关系前三项动态项求得的前三项电流分量 $I_{e_Leq}^1$ 、 $I_{e_Leq}^2$ 、 $I_{e_Leq}^3$ 波形如图13所示。

可以发现,图13中的 $I_{e_Leq}^1$ 、 $I_{e_Leq}^2$ 和 $I_{e_Leq}^3$ 波形与系统动态一致,也呈现振荡收敛趋势,并且根据电流分量随着项数增大依次嵌套求导的规律得出的电流分量阶数越高的动态项影响越小的分析保持

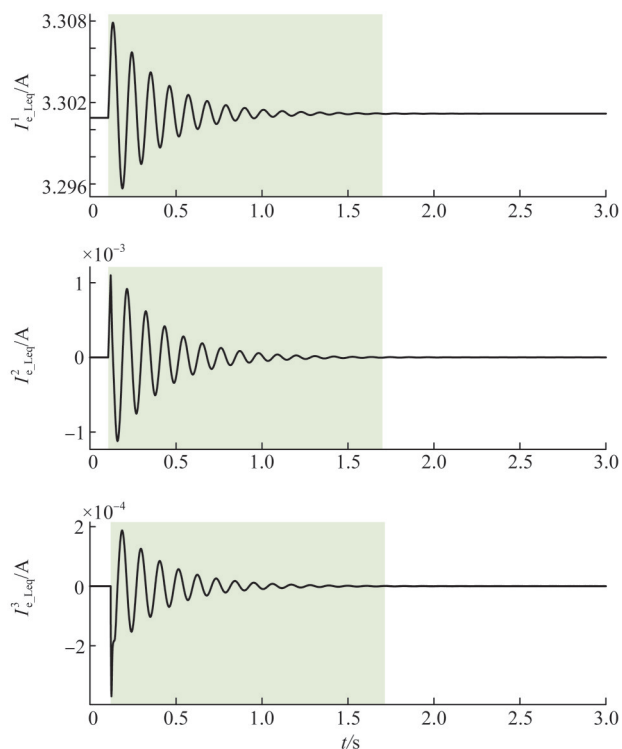


图 13 系统闭环仿真中交流线路关系求得的前三项电流分量的波形

Fig. 13 Waveforms of the first three current components obtained from the AC line relationship in closed-loop simulation of the system

一致。

进一步分析系统中变换器设备、交流线路的能量存储行为，系统中的功率流向示意如图 14 所示。

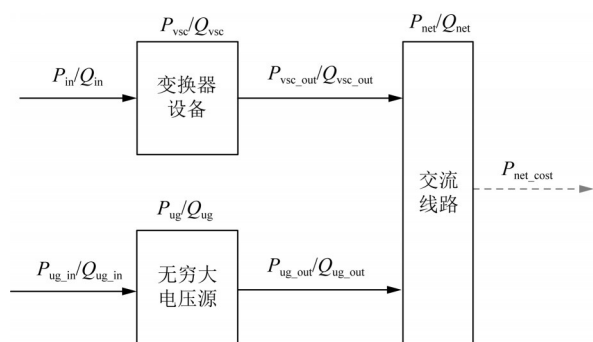


图 14 系统中的功率流向示意图

Fig. 14 Schematic diagram of power flow in the system

图 14 中箭头指向为规定的正方向，变换器设备、无穷大电压源向交流线路送功率，交流线路吸收变换器设备、无穷大电压源功率的方向为正方向。特别地，感性交流线路作为无功负荷，结合其

能量存储机制的分析，需要关注其持续消耗的功率 $Q_{\text{net_cost}}$ 。

存储在变换器设备、交流线路、无穷大电压源上的有功功率、无功功率分别为 $P_{\text{vsc}}/Q_{\text{vsc}}$ 、 $P_{\text{net}}/Q_{\text{net}}$ 、 $P_{\text{ug}}/Q_{\text{ug}}$ 。在系统稳定工作时交流线路上只有 $Q_{\text{net_cost}}$ ，没有 $P_{\text{net_cost}}$ 。而在系统动态过程中系统中所有的功率存在式(12)所示关系。

$$\begin{cases} P_{\text{vsc}} + P_{\text{net}} + P_{\text{ug}} = P_{\text{in}} + P_{\text{ug_in}} \\ Q_{\text{vsc}} + Q_{\text{net}} + Q_{\text{ug}} = Q_{\text{in}} + Q_{\text{ug_in}} - Q_{\text{net_cost}} \end{cases} \quad (12)$$

式中： P_{in} 、 $P_{\text{ug_in}}$ 分别为无限大电源的输入有功功率； Q_{in} 、 $Q_{\text{ug_in}}$ 分别为变流器设备无限大电源的输入无功功率。

式(12)表明：系统内的变换器设备、交流线路与无穷大电压源之间存在功率交换，且系统各部分功率交换的瞬时功率之和，与外界输入系统的功率、系统耗散至外界功率及交流线路损耗功率之和实时保持平衡。

基于系统参数开展 MATLAB/Simulink 仿真，施加与 4.1 节相同的扰动，重点关注基于变换器设备和交流线路能量存储行为的系统中，变换器设备与交流线路的功率交换情况。图 15 中前三组 $P_{\text{vsc}}/Q_{\text{vsc}}$ 、 $P_{\text{net}}/Q_{\text{net}}$ 、 $P_{\text{ug}}/Q_{\text{ug}}$ 曲线，反映了变换器设备、交流线路、无穷大电压源与系统之间的有功/无功功率交换；最后一组功率曲线则反映了系统中装备与交流线路的有功/无功功率交换情况。

由图 15 可知，在系统动态过程中，变换器设备与交流线路间存在明显的功率交换，而能量变化量是扰动开始后功率的积分，因此二者也发生了能量交换。这与传统认知中“电感线路仅承担功率传输功能且仅存在无功损耗”的情况显然不同。可见，交流线路作为储能元件，其动态特征在系统动态过程中不可忽略的物理本质在于它与变换器设备之间同时进行了有功功率和无功功率的交换，以及相应的能量交换。

若以交流线路为能量交换的主要研究对象，可将系统中除交流线路外的其他装备作为整体进行分析。如图 15 中的第 4 组功率曲线所示，装备的 $P_{\text{device}}/Q_{\text{device}}$ 与交流线路的 $P_{\text{net}}/Q_{\text{net}}$ 分别关于横轴 $P=0$ 和 $Q=0$ 对称。后文分析系统参数改变对交流线路能量存储行为及能量参与系统动态过程的影响时，也将重点关注这一波形特征。

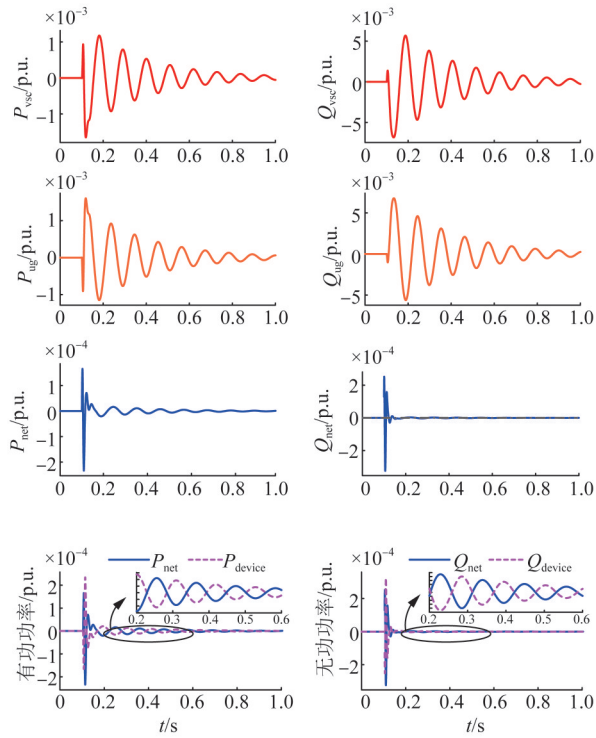


图15 系统中的有功/无功功率波形

Fig. 15 Active/reactive power waveforms in the system

4.3 控制参数、线路电感变化对系统闭环动态过程影响分析

本节主要研究变换器设备控制参数与线路电感大小的改变对系统闭环动态过程中交流线路动态特征、交流线路能量存储行为的影响,深化对系统动态过程物理本质的认识。

首先研究变换器设备控制参数改变对系统动态过程的影响,设置变换器并网系统参数如下:1)基准值: $P_b=100$ kW, $V_b=690$ V, $\omega_b=100\pi$ rad/s, $V_{dcb}=1100$ V; 2) 电路参数: $L_r=0.1$ p. u., $L_g=0.2$ p. u., $A_g=1$ p. u., $\omega_g=100\pi$ rad/s, $\varphi_{g0}=0$ rad; 3) 控制参数: $i_{dref}^p=0.8$ p. u., $i_{qref}^p=0$ p. u., ACC: $k_{pi}=0.25$, $k_{ii}=100$ 。

如表2所示设置变换器设备控制参数分别为案例a、b、c,进行闭环仿真。设置 $t=0.1$ s时,锁相

表2 变换器设备控制参数调整

Tab. 2 Adjustment of control parameters for VSC

案例	变换器设备参数	数值
a	k_{pp}, k_{ip}	5, 4 000
b	k_{pp}, k_{ip}	4, 8 000
c	k_{pp}, k_{ip}	2, 13 500

频率偏离其稳态运行点0.5 rad/s并以此作为扰动初始状态,系统将从扰动后的初值开始演化。

图16—17分别为改变变换器设备控制参数得到案例a、b、c中电流分量 $I_{e_Leq}^2$ 和 $I_{e_Leq}^3$ 的波形和交流线路与装备有功/无功功率波形。

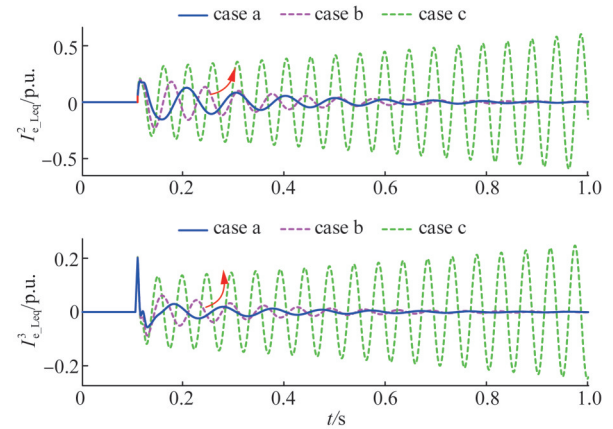
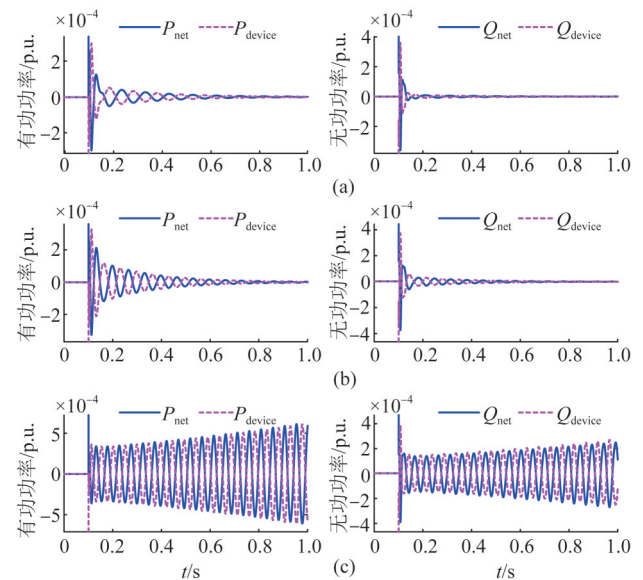
图16 改变变换器设备控制参数得到案例a、b、c中电流分量 $I_{e_Leq}^2$ 和 $I_{e_Leq}^3$ 的波形Fig. 16 Changing the control parameters of the VSC to obtain the waveforms of the current components $I_{e_Leq}^2$ and $I_{e_Leq}^3$ in cases a, b and c

图17 改变变换器设备控制参数得到案例a、b、c中交流线路与装备有功/无功功率波形

Fig. 17 Changing the control parameters of the VSC to obtain the active/reactive powers waveforms of the AC line and device in cases a, b and c

在系统闭环动态过程中,交流线路关系动态项计算得到的电流分量大小,能够反映交流线路的关

系动态特征。后续分析将以电流分量 $I_{e_Leq}^2$ 和 $I_{e_Leq}^3$ 为例展开, 结合图 16 可以发现: 交流线路关系中, 二阶动态项对输出电流的影响小于一阶动态项; 当 ω_m 增大时, 动态项波形幅值随阶数增大的衰减速度会变慢, 高阶动态项对应的输出电流分量波形振幅也会更大, 这意味着关系中的高阶动态项影响更为显著。

综上, 随着变换器设备控制参数的改变, 结合交流线路关系动态项作用程度的变化趋势可以得出: 系统振荡频率越高, 交流线路的关系动态特征越不可忽略; 交流线路越趋于高阶, 系统对应的阶数也会随之升高, 系统的振荡风险也就越大。接下来将关注交流线路的能量存储行为。图 17 展示了交流线路与系统中变换器设备的功率交换情况, 从中可以看出: 系统振荡情况的变化, 是变换器设备控制参数改变后, 交流线路动态特征发生变化, 进而引发变换器设备与交流线路之间能量交换行为改变所导致的。

然后, 研究线路电感大小的改变对交流线路参与系统闭环动态过程的影响, 设置变换器并网系统参数如下: 1) 基准值: $P_b=100$ kW, $V_b=690$ V, $\omega_b=100\pi$ rad/s, $V_{dcb}=1100$ V; 2) 电路参数: $L_f=0.1$ p. u., $L_g=0.2$ p. u., $A_g=1$ p. u., $\omega_g=100\pi$ rad/s, $\varphi_{g0}=0$ rad; 3) 控制参数: $i_{dref}^p=0.8$ p. u., $i_{qref}^p=0$ p. u., ACC: $k_{pi}=1$, $k_{ii}=180$, PLL: $k_{pp}=10$, $k_{ip}=20\ 000$ 。如表 3 所示设置电感大小分别为案例 a、b, 进行闭环仿真。设置相同的扰动, 关注后续振荡过程。

表 3 线路电感参数调整

Tab. 3 Adjustment of AC line inductance parameters

案例	线路电感参数	数值
a	L_g	0.2 p. u.
b	L_g	0.5 p. u.

先关注系统交流线路环节中高阶动态项对应的电流分量 $I_{e_Leq}^2$ 和 $I_{e_Leq}^3$ 的作用程度, 如图 18 所示。

可以发现, 在交流线路关系中, 动态项的阶数越高, 对输出电流波形的影响程度越小; 而振荡频率越大时, 交流线路动态关系中的高阶动态项影响越大, 其输出波形的振幅也越大。由此可得出结论: 系统振荡频率越高, 交流线路关系动态项的作用程度就越大, 此时交流线路的动态特征越不能被

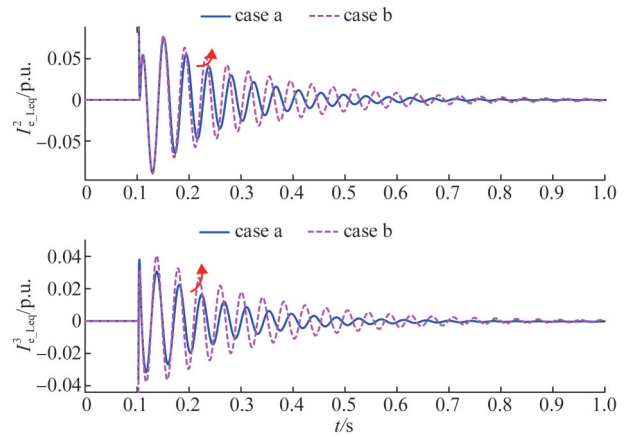


图 18 改变线路电感参数得到案例 a、b 中电流分量 $I_{e_Leq}^2$ 和 $I_{e_Leq}^3$ 波形

Fig. 18 Changing the inductance parameters of the circuit to obtain the waveforms of current components $I_{e_Leq}^2$ and $I_{e_Leq}^3$ in cases a and b

忽略, 线路也越趋于高阶, 系统的对应阶数随之升高, 振荡风险也就越大。接下来关注交流线路的能量存储行为, 得到如图 19 所示的波形。可以看出, 系统振荡情况的变化是线路电感大小改变后交流线路动态特征发生变化, 进而引起变换器设备与交流线路之间能量交换行为改变所导致的。

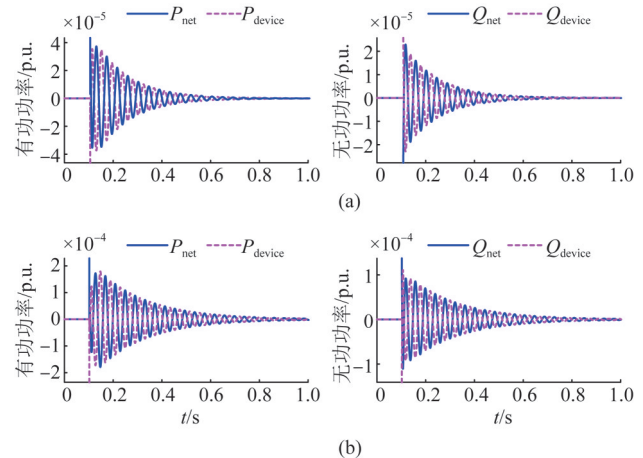


图 19 改变线路电感参数得到案例 a、b 中交流线路与装备有功/无功功率波形

Fig. 19 Changing the line inductance parameters to obtain the active/reactive power waveforms of the AC line and device in cases a and b

综上, 结合变换器设备控制参数与线路电感大小的变化, 通过分析系统动态过程中交流线路的动态特征以及变换器设备与交流线路的能量交换行为可总结得出: 动态过程中, 交流线路动态特征对系

统振荡的影响需纳入考量;当交流线路的动态特征不可忽略时,其阶数越高,系统阶数相应越高,振荡风险也随之增大,这意味着此时交流线路作为储能元件的储能规模可能与变换器设备相近,进而引发系统振荡;系统振荡的物理本质正是变换器设备与交流线路这两个储能元件之间的能量交换。

5 结论

交流输电线路作为电力系统的重要组成部分,是参与系统振荡能量交换的核心主体之一。当前研究多聚焦于交流瞬时值层面的数学关系,对交流输电线路参与系统动态过程中,有功与无功功率交换的物理机制认知存在不足。针对这一现状,本文从交流瞬时值现象背后不平衡力驱动交变运动状态变化的角度,开展了交流线路能量存储机制及其在系统动态过程中角色的研究,主要结论与创新点如下。

1) 交流输电线路遵循“有功/无功功率不平衡激励-电流幅值/频率动态响应”的基本原理运行,通过这一动态关系实现对有功功率、无功功率两种电能的吸收与释放;它是可存储有功和无功电能的两维能量存储元件。

2) 交流输电线路通过“并网端口有功/无功功率不平衡→调节自身电流幅值/频率→影响并网端口有功/无功功率”的路径,促使设备调节自身内电势的幅值与频率,改变注入并网端口的有功、无功功率,从而参与系统动态过程;变换器并网系统的振荡,本质是交流线路构成的网络与变换器并网设备之间有功、无功电能的相互交换。

3) 系统参数变化导致振荡现象出现差异,实则是参数变化改变了交流输电线路与变换器并网设备的动态特性,进而使设备与网络的能量交换行为发生变化。

本文的研究成果在一定程度上填补了当前对交流网络参与系统振荡能量交换物理机制的认知空白,为进一步揭示振荡的一般机理、形成更普适的振荡分析与控制方法提供了重要的理论基础支撑。目前本文仅探讨了简单电感输电线路的能量存储机制,针对性更复杂的输电线路及不同拓扑结构的输电网络等的相关机制,仍有待深入研究。

参考文献

- [1] ZHAO M, YUAN X, HU J. Voltage dynamics of current control time-scale in a VSC-connected weak grid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2925–2937.
- [2] 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, 25.
LIU Jizhen. 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, 25.
- [3] 文天舒, 张纯江, 张恺轩, 等. 异构变流器并联系统全频段振荡抑制策略研究[J]. 高压电器, 2025, 61(11): 118–128.
WEN Tianshu, ZHANG Chunjiang, ZHANG Kaixuan, et al. Research on full-band oscillation suppression strategy for hybrid grid-forming/grid-following converter systems [J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(11): 118–128.
- [4] 赵国生, 王洪光, 李辉. 抑制电力系统低频振荡的磁控变压器附加控制[J]. 南方电网技术, 2025, 19(2): 28–35.
ZHAO Guosheng, WANG Hongguang, LI Hui. Additional control of magnetic controlled transformer for suppressing low frequency oscillation in power systems [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(2): 28–35.
- [5] YANG X, WEI Z, SUN G. Distribution system state estimation considering the characteristics of power electronic loads [C]//2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, July 27–31, 2014, National Harbor, MD, USA. New York: IEEE, 2014: 1–5.
- [6] LIANG X. Emerging power quality challenges due to integration of renewable energy sources [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(2): 855–866.
- [7] 袁小明, 李胜. 电力系统中变换器电流时间尺度动态过程分析的幅值/频率调制方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4732–4744.
YUAN Xiaoming, LI Sheng. An amplitude/frequency modulation based method of voltage source converter for power systems dynamic analysis in current control timescale [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4732–4744.
- [8] 袁小明, 张美清, 迟永宁, 等. 电力电子化电力系统动态问题的基本挑战和技术路线[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1904–1917.
YUAN Xiaoming, ZHANG Meiqing, CHI Yongning, et al. Basic challenges of and technical roadmap to power-electronized power system dynamics issues [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1904–1917.
- [9] 何维, 袁小明, 景浩文, 等. 基于有功/无功不平衡激励-内电势幅值响应的设备统一模型[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(8): 2–11.
HE Wei, YUAN Xiaoming, JING Haowen, et al. Unified device model of active/reactive imbalance excitation-internal electric potential amplitude/frequency response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(8): 2–11.
- [10] 袁小明, 王思成, 负阳阳. 锁相并网设备的独立激励-响应机制及基于幅频运动方程的设备特性表征方法[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 1–14.
YUAN Xiaoming, WANG Sicheng, YUN Yangyang. Independent excitation-response mechanism of PLL-based grid-connected unit and role characterization method for unit based on amplitude-frequency motion equation [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 1–14.
- [11] 龚轩, 袁小明, 胡家兵. 锁相环对锁相型并网变换器有功/无功电流激励-内电势幅值/频率响应关系的影响机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3904–3916.

- GONG Xuan, YUAN Xiaoming, HU Jiabing. Influence mechanism of PLL on active/reactive current excitation and internal voltage amplitude/frequency response relationship of PLL-based VSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3904 – 3916.
- [12] 付天照, 袁小明, 龚轩. 并网变换器电流-内电势与端电压-电流激励-响应特性的等效机制及仿真分析[J]. 电源学报, 2025, 23(6): 190 – 198.
- FU Tianzhao, YUAN Xiaoming, GONG Xuan. Equivalent mechanism and simulation analysis of current-internal voltage and terminal voltage-current excitation-response characteristics of grid-connected converter[J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(6): 190 – 198.
- [13] 洪宇, 袁小明, 龚轩. 锁相同步并网变换器电流控制内电势幅值/频率形成机制分析[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 112 – 120.
- HONG Yu, YUAN Xiaoming, GONG Xuan. Analysis of formation mechanism of internal voltage amplitude/frequency in current control of phase-locked synchronous grid-connected converter[J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 112 – 120.
- [14] 张亮亮, 雷银照. 相量法历史上的三篇经典文献[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 94 – 100.
- ZHANG Liangliang, LEI Yinzhaoh. Three classical papers on the history of the phasor method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 94 – 100.
- [15] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [16] 周孝信, 何志华, 张祖平. 电力系统阻尼特性和低频振荡现象的分析[J]. 电网技术, 1984(Z1): 1 – 11.
- ZHOU Xiaoxin, HE Zhihua, ZHANG Zuping. Analysis of power system damping characteristics and low-frequency oscillation phenomena[J]. Power System Technology, 1984(Z1): 1 – 11.
- [17] GAUTAM D, VITTAL V. Impact of DFIG based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems [C]//2009 IEEE PES General Meeting, July 26 – 30, 2009, Calgary, AB, Canada. New York: IEEE, 2009.
- [18] EFTEKHARNEJAD S, VITTAL V, HEYDT G T, et al. Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 893 – 901.
- [19] RUEDA J L, ERLICH I. Impact of large scale integration of wind power on power system small signal stability [C]//2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DPRT), July 6 – 9, 2011, Weihai, China. New York: IEEE, 2011: 673 – 681.
- [20] 李响, 武海潮, 王文雪, 等. 考虑大规模新能源接入的电网性能评价指标体系[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 178 – 187.
- LI Xiang, WU Haichao, WANG Wenxue, et al. Performance evaluation index system of a power grid considering large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 178 – 187.
- [21] WANG L, XIE X, JIANG Q. Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series-compensated power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2772 – 2779.
- [22] HUANG Y, ZHAI X, HU J. Modeling and stability analysis of VSC internal voltage in DC-Link voltage control timescale[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(1): 16 – 28.
- [23] YANG H, YUAN X. Modeling and analyzing the effect of frequency variation on weak grid-connected VSC system stability in DC Voltage control timescale[J]. Energies, 2019, 12(23): 4458 – 4469.
- [24] 王伟胜, 李光辉, 何国庆. 新能源并网系统宽频振荡分析与抑制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2022.
- [25] 刘威, 谢小荣, 黄金魁, 等. 并网变流器的频率耦合阻抗模型及其稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 138 – 146.
- LIU Wei, XIE Xiaorong, HUANG Jinkui, et al. Frequency-coupled impedance model and stability analysis of grid-connected converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 138 – 146.
- [26] YUE X, WANG X, BLAABJERG F. Review of small-signal modeling methods including frequency-coupling dynamics of power converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3313 – 3328.
- [27] WANG X, BLAABJERG F. Harmonic stability in power electronic-based power systems: concept, modeling, and analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2858 – 2870.
- [28] WEN B, DONG D, BOROEYEVICH D. Impedance-based analysis of grid-synchronization stability for three-phase paralleled converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 26 – 38.
- [29] WANG X, HARNEFORS L, BLAABJERG F. Unified impedance model of grid-connected voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1775 – 1787.
- [30] LIU H, XIE X. Impedance network modeling and quantitative stability analysis of sub-/super-synchronous oscillations for large-scale wind power systems[J]. IEEE Access, 2018(6): 34431 – 34438.
- [31] 袁小明, 何维. 动态过程的幅频调制统一本质与系统稳定问题分类及新能源发电构网能力创新[J]. 电源学报, 2021, 19(6): 1 – 9.
- YUAN Xiaoming, HE Wei. Amplitude/frequency as prerequisites of operation and thus classification of stability problems and capability opportunities for new generations[J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(6): 1 – 9.

收稿日期: 2025-08-01;网络首发日期:2026-03-08

作者简介:

徐秋朦(2000), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子化电力系统动态分析, 1602142819@qq.com;

王思成(1995), 男, 通信作者, 博士后, 博士, 研究方向为电力电子化电力系统动态分析与控制, sicheng_wang@hust.edu.cn;

袁小明(1966), 男, 教授, 博士, 研究方向为可再生能源发电设备及其控制、直流输电系统及其控制、电力电子化电力系统安全稳定分析与控制, yuanxm@hust.edu.cn。