DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.7.94 **中图分类号**：TM342 **文献标志码**：A

计及励磁响应特性的同步调相机阻抗建模方法

李 华[1]，陆明璇[1]，李汶铮[2]，董文凯[2]，韩震焘[1]，谢小荣[2]
(1.国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院，沈阳 110000；2.清华大学电机系，北京 100080)

摘要：同步调相机可有效改善新能源接入弱电网引发的振荡问题，但现有面向振荡分析的调相机建模方法大多未考虑励磁调节器的控制作用，应用于低频功率振荡分析时不够准确，导致模型适用范围受限。为此，提出计及励磁响应特性的同步调相机阻抗建模方法。首先建立了同步机通用阻抗模型；然后分析了自并励静止励磁系统对调相机阻抗特性的影响，将励磁模型与同步机模型联立得到调相机整体阻抗模型；最后，通过仿真算例验证了所提方法的有效性。分析结果表明：调相机阻抗在工频附近(对应功率低频)会出现峰值，励磁系统会显著减小该峰值阻抗；自并励静止励磁系统会显著改变工频周围的阻抗，使之呈多峰特征。

关键词：同步调相机；阻抗建模；励磁系统；振荡稳定性

Impedance Modeling of Synchronous Compensator with the Consideration of Excitation Response

LI Hua[1], LU Mingxuan[1], LI Wenzheng[2], DONG Wenkai[2], HAN Zhentao[1], XIE Xiaorong[2]
(1. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Economic and Technological Research Institute, Shenyang 110000, China;
2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100080, China)

Abstract: Synchronous compensator can effectively improve the oscillation problem caused by renewable energy connected to a weak grid, but most of the existing regulator modeling methods for oscillation analysis do not take into account the control role of the excitation regulator, which is not accurate enough when applied to the analysis of low-frequency power oscillations, resulting in the limited scope of application of the model. For this reason, a synchronous compensator impedance modeling method that takes into account the excitation response characteristics is proposed. Firstly, a general impedance model of synchronous machine is established. Then, the influence of the self-shunt static excitation system on the impedance characteristics of the compensator is analyzed, and the overall impedance model of the compensator is obtained by associating the excitation model with the synchronous machine model. Finally, the validity of the proposed method is verified by simulation cases, and the analytical results show that: the impedance of the compensator will peak near the industrial frequency (corresponding to low power frequency), and the excitation system will significantly reduce the peak impedance; the self-parallel static excitation system will significantly change the impedance around the power frequency, so that the impedance will be characterized by multiple peaks.

Keywords: Synchronous compensator; impedance modeling method; excitation system; oscillation stability

近年来我国能源结构正在发生重大变革，构建以新能源为主体的新型电力系统，既是能源电力行业转型的必然要求，也是实现“双碳”目标的重要途径[1]。但是在弱电网中，新能源机组变流器控制性能恶化，这易引发系统振荡[2-3]。调相机配置是当前实际工程中普遍采用的提升电网强度的措施，

收稿日期：2024-07-30；**修回日期**：2024-09-15；**录用日期**：2024-10-03；**网络首发日期**：2024-10-21
基金项目：国网辽宁省电力有限公司科技资助项目(2023YF-148)
This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd. under the grant 2023YF-148

对抑制新能源接入弱电网的系统振荡具有重要意义[4-5]。由于调相机配置成本较高，当前面向振荡稳定提升的调相机优化配置方法得到广泛关注与研究[6-7]。合理准确地建立同步调相机阻抗模型，是有效发挥其振荡稳定提升作用的关键。

阻抗法是振荡分析中的常用方法，对于新能源机组等黑/灰箱设备，其阻抗模型可通过测量获得[8]，因此，阻抗法在新能源并网系统振荡分析中具有显著优势。文献[9]将阻抗法与特征值分析法、时域仿真分析法等进行原理与适用性对比，通过实际系统验证了阻抗法的合理性与准确性；文献[10]提出了同步机电气环节的小信号阻抗建模思路，已成为目前最常用的建模方法；在此基础上，文献[11-12]分析了轴系刚体结构和扭振特性对汽轮机组阻抗的影响；文献[13-14]提出了直驱与双馈风机的阻抗建模方法；文献[15]提出了针对虚拟同步机的建模方法。这些研究为高比例新能源电力系统振荡建模与分析提供了良好的基础。目前通过调相机并网抑制振荡的研究中，调相机建模方法均沿用上述同步机建模思路。然而，调相机以无功输出为主，主要依靠过励与欠励控制无功的发出和吸收，励磁系统对其阻抗特性可能产生较大影响，而文献[10-15]均采用简化励磁模型，对励磁调节器的控制环节未进行深入研究。为此，本文调研了文献[16-17]，其均对电机励磁系统传递函数进行了简化。其中文献[16]提出了便于计算分析的简化线性励磁模型，在传统励磁系统中该模型应用较为准确，因此发展为同步机励磁建模的主要模型，如文献[10-12,15]建模时参考的小信号励磁模型；文献[17]考虑了励磁系统反馈环节。文献[18]在此基础上提出了调相机阻抗建模方法，从阻抗结果来看，与目前常用的同步机简化励磁模型基本一致。简化模型的励磁增益在远离工频后仅具备单调衰减性质，在自并励静止励磁等较为复杂的励磁系统中，励磁传递函数可能存在非单调、过零点等复杂特性，这无法用简化模型表示，因此同步调相机阻抗建模方法仍待进一步研究。

针对上述问题，本文提出了适用于调相机的阻抗建模方法。首先，建立了同步机电气环节的阻抗模型；然后，分析了励磁系统对同步机阻抗特性的影响机理，提出了计及静止励磁响应特性的调相机阻抗建模方法；最后，通过算例分析，验证了所提方法的有效性。

1　同步电机阻抗模型

同步调相机主要由同步电机与励磁系统 2 个部分构成，本节首先给出同步电机的阻抗模型，以为后续的同步调相机阻抗建模提供基础。

本文采用小信号建模的思路，通过分析电机端电压扰动 $\Delta \boldsymbol{u}_{dq}$ 与电流响应 $\Delta \boldsymbol{i}_{dq}$ 的频域关系，构建调相机阻抗矩阵。在文献[10-11,18]等所提同步机电磁方程的基础上，将求导项 d/dt 用算子 s 表示，并基于调相机无轴系的特征，忽略角速度扰动量 $\Delta\omega$，得到小信号电压扰动与电流响应方程组，即

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_{\mathrm{f}} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\mathrm{a}} & 0 & 0 \\ 0 & R_{\mathrm{f}} & 0 \\ 0 & 0 & R_{\mathrm{D}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Delta i_d \\ \Delta i_{\mathrm{f}} \\ \Delta i_{\mathrm{D}} \end{bmatrix} + s \begin{bmatrix} x_d & x_{ad} & x_{ad} \\ x_{ad} & x_{\mathrm{f}} & x_{ad} \\ x_{ad} & x_{ad} & x_{\mathrm{D}} \end{bmatrix} \cdot \\ \qquad \begin{bmatrix} -\Delta i_d \\ \Delta i_{\mathrm{f}} \\ \Delta i_{\mathrm{D}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega_0 x_q & \omega_0 x_{aq} & \omega_0 x_{aq} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Delta i_q \\ \Delta i_{\mathrm{g}} \\ \Delta i_{\mathrm{Q}} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Delta u_q \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\mathrm{a}} & 0 & 0 \\ 0 & R_{\mathrm{g}} & 0 \\ 0 & 0 & R_{\mathrm{Q}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Delta i_q \\ \Delta i_{\mathrm{g}} \\ \Delta i_{\mathrm{Q}} \end{bmatrix} + s \begin{bmatrix} x_q & x_{aq} & x_{aq} \\ x_{aq} & x_{\mathrm{g}} & x_{aq} \\ x_{aq} & x_{aq} & x_{\mathrm{Q}} \end{bmatrix} \cdot \\ \qquad \begin{bmatrix} -\Delta i_q \\ \Delta i_{\mathrm{g}} \\ \Delta i_{\mathrm{Q}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_0 x_d & \omega_0 x_{ad} & \omega_0 x_{ad} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Delta i_d \\ \Delta i_{\mathrm{f}} \\ \Delta i_{\mathrm{D}} \end{bmatrix} \end{cases} \tag{1}$$

式中：下标 d、q、f、D、Q、g 分别表示相应变量的 d 轴、q 轴、励磁绕组 f 及阻尼绕组 D、Q、g 的分量；下标 a 表示电枢；R_{a} 为定子电阻；x_{ad}、x_{aq} 分别为 d、q 轴电枢反应电抗；Δi 和Δu 分别为电流和电压的小信号扰动或响应；ω_0 为转子额定角速度。

由式(1)可得各绕组电流向量 $\Delta \boldsymbol{I}$、端电压扰动向量$\Delta \boldsymbol{u}_{dq}$及励磁电压绕动量$\Delta u_{\mathrm{f}}$之间的小信号频域关系为

$$\begin{cases} s\Delta \boldsymbol{I} = \boldsymbol{A}\Delta \boldsymbol{I} + \boldsymbol{B}_1\Delta \boldsymbol{u}_{dq} + \boldsymbol{B}_2\Delta u_{\mathrm{f}} \\ \Delta \boldsymbol{i}_{dq} = \boldsymbol{C}\Delta \boldsymbol{I} \end{cases} \tag{2}$$

式中：$\Delta \boldsymbol{I} = [\Delta i_d \quad \Delta i_{\mathrm{f}} \quad \Delta i_{\mathrm{D}} \quad \Delta i_q \quad \Delta i_{\mathrm{g}} \quad \Delta i_{\mathrm{Q}}]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{A}_1^{-1}\boldsymbol{A}_2$，$\boldsymbol{A}_1 = \begin{bmatrix} -x_d & x_{ad} & x_{ad} & & & \\ -x_{ad} & x_{\mathrm{f}} & x_{ad} & & \boldsymbol{0} & \\ -x_{ad} & x_{ad} & x_{\mathrm{D}} & & & \\ & & & -x_q & x_{aq} & x_{aq} \\ & \boldsymbol{0} & & -x_{aq} & x_{\mathrm{g}} & x_{aq} \\ & & & -x_{aq} & x_{aq} & x_{\mathrm{Q}} \end{bmatrix}$，$\boldsymbol{A}_2 = \begin{bmatrix} R_{\mathrm{a}} & 0 & 0 & -\omega_0 x_q & \omega_0 x_{aq} & \omega_0 x_{aq} \\ 0 & -R_{\mathrm{f}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_{\mathrm{D}} & 0 & 0 & 0 \\ \omega_0 x_d & -\omega_0 x_{ad} & -\omega_0 x_{ad} & R_{\mathrm{a}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -R_{\mathrm{g}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_{\mathrm{Q}} \end{bmatrix}$；

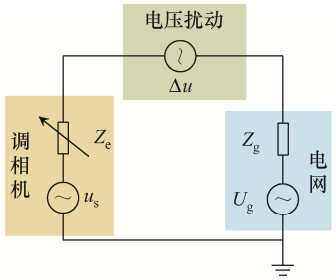
$\boldsymbol{B}_1 = \boldsymbol{A}_1^{-1}\boldsymbol{C}_1$，$\boldsymbol{C}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$；$\Delta \boldsymbol{u}_{dq} = \begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{bmatrix}$；$\boldsymbol{B}_2 = \boldsymbol{A}_1^{-1}\boldsymbol{C}_2$，$\boldsymbol{C}_2 = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^{\mathrm{T}}$；$\Delta \boldsymbol{i}_{dq} = \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix}$；$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{C}_1^{\mathrm{T}}$。

2 计及励磁系统的调相机阻抗建模方法

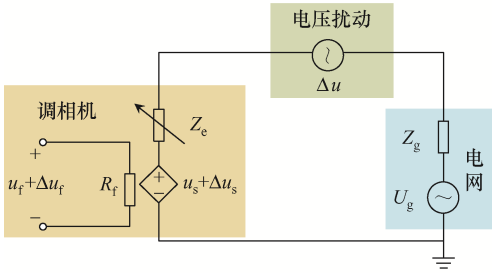
2.1 励磁系统对同步机阻抗特性的影响机理

现有的励磁系统按照结构可分为三机旋转励磁与静止励磁 2 大类。三机旋转励磁结构中同步机励磁电压由主励磁机提供，静止励磁的励磁电压则由副励磁机(一般为永磁电机)提供。这种励磁系统运行较稳定，在大型同步机组中应用普遍，然而由于其响应慢、维护成本高等问题，近年来逐步被改造为自并励静止励磁系统[19-20]。文献[21]综述了不同旋转励磁系统升级为静止励磁的方案，并总结了各类静止励磁系统的优势。在自并励静止励磁方式下，同步机端电压既经过变压器作为励磁系统电源，又经过整流器作为励磁调节器的输入信号。这种结构特点使其不论采取怎样的控制原理，机端电压扰动均会同时影响励磁系统的功率单元和信号处理单元，但其传递函数大多十分复杂，不能再用简化模型表示。

图 1 为不同励磁方式下调相机并网系统等效电路模型。图中：Z_{e}为恒压励磁模式下调相机绕组阻抗；u_{s}为调相机工频稳态电压；Z_{g}为电网阻抗；U_{g}为电网电压；u_{f}为励磁电压；R_{f}为励磁绕组电阻；Δu_{s}为电压扰动量。励磁机工作在恒压励磁方式下时，Δu_{f}=0，调相机可看作独立电压源，如图 1(a)所示；当加入励磁调节器时，小扰动信号 Δu 会通过励磁系统产生响应 Δu_{f}，继而在机端产生同频的电压响应 Δu_{s}，此时调相机应作为受控源处理，如图 1(b)所示。



(a) 恒压励磁方式



(b) 励磁调节方式

图 1 同步调相机并网系统等效电路模型

Fig. 1 Equivalent circuit model of grid-connected system for synchronous compensator

根据以上分析，励磁系统对调相机的影响可大致分为 3 类。

(1)励磁机以恒压励磁方式工作：u_{f} 恒定，Δu 不会引起励磁系统响应，即 Δu_{f}=0，此时，调相机阻抗 Z=Z_{e}。

(2)三机励磁等简单励磁系统参与电压调节：扰动信号 Δu 经线性励磁系统产生响应 Δu_{f}，导致调相机受控源出现与 Δu 反向的扰动 Δu_{s}，Z=Z_{e}+$\Delta u_{\mathrm{s}}/\Delta i$，其中 Δi 为调相机对 Δu 的电流响应量，Δu_{s}

与 Δi 同频异号，Z 较第(1)类中有所减小。

(3)自并励静止励磁等复杂励磁系统参与电压调节：励磁系统响应过程及阻抗与第(2)类一致，但扰动信号 Δu 也会引起励磁系统功率单元输出发生变化，复杂的控制结构使 Δu_{f} 的频谱特性不易解析判断，其对 Z 的影响需通过拟合计算来确认。

2.2 自并励静止励磁模型

式(2)中 $\boldsymbol{B}_2\Delta u_{\mathrm{f}}$ 一项反映了励磁系统对同步电机动态特性的影响。由于 Δu_{f} 为端电压扰动 $\Delta \boldsymbol{u}_{dq}$ 的响应量，故可从励磁系统传递函数角度出发，推导 $\Delta \boldsymbol{u}_{dq}$-$\Delta u_{\mathrm{f}}$ 的频域关系式，进而通过换元构建同步电机与励磁系统模型之间的联系。

IEEE 对静止励磁系统有诸多标准，本文选用 PSCAD 模型库中收录的基于 IEEE 标准 V2 固态协调型静止励磁机开展励磁系统建模。励磁系统框图如图 2 所示，其传递函数相较于其他 IEEE 标准的静止励磁系统便于推导计算，且保留了自并励的特征。由图 2 可见，该励磁系统整体传递函数呈非线性特性，而现有线性励磁模型仅描述了图中励磁模块的动态，可能无法准确反映励磁系统整体动态对同步调相机阻抗特性的影响。第 3 节将通过算例分析对此展开进一步研究。

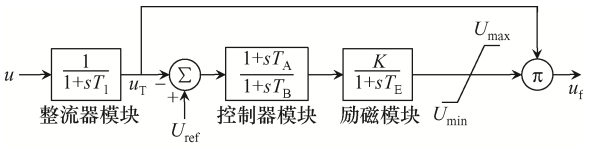


图 2　V2 固态协调型静止励磁系统

Fig. 2 V2 compatible solid state excitation system

图 2 中：u 为机端电压信号；T_1 为整流器时间常数；u_{T} 为整流后输入励磁调节器与功率单元的信号；U_{ref} 为参考电压；T_{A}、T_{B} 和 T_{E} 分别为控制器超前、滞后时间常数及励磁时间常数；K 为励磁增益；$U_{\max}$ 和 $U_{\min}$ 分别为励磁电压上、下限。系统的整体传递函数可表示为

$$u_{\mathrm{f}}=\frac{u}{1+sT_1}\left(U_{\mathrm{ref}}-\frac{u}{1+sT_1}\right)\frac{K}{1+sT_{\mathrm{E}}}\frac{1+sT_{\mathrm{A}}}{1+sT_{\mathrm{B}}} \tag{3}$$

由于静止励磁系统的功率单元与励磁调节器共用端电压信号，即便是简化模型，式(3)中依然出现了非线性的电压平方项，但可通过局部线性化得到端电压扰动与励磁响应之间的频域关系。从 dq 轴方向对端电压 u 进行微分可得

$$\Delta u=\frac{1}{u}\boldsymbol{U}\Delta \boldsymbol{u}_{dq} \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{U}=[u_d \quad u_q]$。

设调相机稳态工作在参考电压处，即 u=U_{ref}=1 p.u.，对式(3)进行局部线性化可得励磁响应与端电压扰动之间的关系为

$$\Delta u_{\mathrm{f}}=-\frac{K(1+sT_{\mathrm{A}})(1-sT_1)}{(1+sT_{\mathrm{E}})(1+sT_1)^2(1+sT_{\mathrm{B}})}\boldsymbol{U}\Delta \boldsymbol{u}_{dq}=H(s)\boldsymbol{U}\Delta \boldsymbol{u}_{dq} \tag{5}$$

式中，$H(s)$为励磁系统小信号传递函数。

直流、交流及静止励磁系统虽有不同的控制原理与传递函数，但均可通过局部线性化的方式得到相应的 $H(s)$，因此本节所提建模方法也可应用于其他复杂励磁系统。对于三机励磁等传统励磁系统，其传递函数相对简单，无二阶电压项，励磁系统可以用简化模型替代，仅保留图 2 中的励磁模块，即 H(s)=K/(1+sT_{E})，此时式(5)的形式与文献[12,15]等采用的简化励磁模型一致。

2.3 考虑励磁调节器的同步调相机整体阻抗建模方法

联立式(2)和式(5)可得同步调相机小信号频域关系为

$$\begin{cases}s\Delta \boldsymbol{I}=\boldsymbol{A}\Delta \boldsymbol{I}+[\boldsymbol{B}_1+H(s)\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{U}]\Delta \boldsymbol{u}_{dq}\\ \Delta \boldsymbol{i}_{dq}=\boldsymbol{C}\Delta \boldsymbol{I}\end{cases} \tag{6}$$

基于式(6)可得同步调相机整体阻抗模型为

$$\boldsymbol{Z}_{dq}=\boldsymbol{Y}_{dq}^{-1}=[\boldsymbol{C}(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{C}_{dq}]^{-1} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{Y}_{dq}$为 dq 坐标系下调相机导纳矩阵；$\boldsymbol{I}$ 为单位阵；$\boldsymbol{C}_{dq}$满足

$$\boldsymbol{C}_{dq}=\boldsymbol{B}_1+H(s)\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{U} \tag{8}$$

根据 dq-abc 坐标变换关系，可得静止坐标系下的调相机阻抗模型 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{abc}}$ 为

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{abc}}(s)=\begin{bmatrix}Z_{+,dq}(s-\mathrm{j}\omega_1) & Z_{-,dq}(s-\mathrm{j}\omega_1)\\ Z_{-,dq}^{*}(2\mathrm{j}\omega_1-s) & Z_{+,dq}^{*}(2\mathrm{j}\omega_1-s)\end{bmatrix} \tag{9}$$

式中：$Z_{+,dq}$、$Z_{-,dq}$分别为 dq 坐标系下调相机正、负

序阻抗；$Z^*_{+,dq}$、$Z^*_{-,dq}$ 分别为 $Z_{+,dq}$、$Z_{-,dq}$ 的共轭；j 为虚数符号；ω_1 为工频。

2.4 自并励静止励磁与简化励磁模型对比

目前常用的简化励磁模型仅包括图 2 中的励磁模块。该简化模型在小信号处理前就已满足 u_f 与 u 的线性关系，即式(5)中 $H(s)$的表达式为

$$H(s)=-\frac{K}{1+sT_E} \tag{10}$$

因此称其为简化线性励磁模型。将式(10)代入式(8)，并根据式(7)可得 dq 轴坐标系下的阻抗矩阵表达式为

$$\boldsymbol{Z}_{dq}=\left[\boldsymbol{C}\left(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}\right)^{-1}\left(\boldsymbol{B}_1-\frac{K}{1+sT_E}\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{U}\right)\right]^{-1} \tag{11}$$

第 2.1 节从调相机戴维南模型出发，分析了励磁系统对调相机阻抗的影响。励磁系统通过响应 Δu_f，使调相机受控源环节出现与 Δu 同频的响应，最终使其阻抗相较于恒压励磁方式明显减小。励磁系统改变调相机阻抗的作用主要集中在工频附近，这种特点可以从电路构造与模型参数 2 个方面进行分析。

从励磁绕组电路构造来看，dq 坐标系下工频附近电抗小、绕组时间常数较小、励磁响应快。但随着频率的增高，绕组电抗增大，导致时间常数增大，励磁系统的响应能力快速衰减。

从模型参数角度出发，分析式(5)、式(10)可以发现，随着 s 增大，励磁系统增益会趋近于 0，因此其在远离工频范围对调相机阻抗的影响可以忽略。由式(10)可得，对于简化励磁模型，其传递函数具有一阶低通滤波特性，幅频增益随频率升高而单调衰减，仅在工频附近减小调相机阻抗；由式(5)可得，自并励静止励磁模型复杂度明显增加，随着 s 的增大，系统增益可能非单调衰减，甚至存在过零点，使得调相机阻抗在某些频段反而增大，因此会显著改变工频附近的阻抗特性。此外，励磁系统初始增益 K 主要影响其在工频附近的作用效果；而 T_E 等参数作为衰减系数，主要影响系统增益在远离工频时的衰减速度，T_E 越大，励磁系统的响应能力衰减得越快。

3 算例分析

对同步调相机阻抗模型开展理论计算与扫频测量，据此验证所提方法的有效性。其中，调相机阻抗测量基于 PSCAD/EMTDC 开展，测量方法采用主动阻抗测量，详见文献[8]。对于工频附近阻抗波动明显的区域，本文参考了文献[22]给出的扰动电压自适应控制方法，所得阻抗结果较为精确且不会出现扰动电压过大引起的电流谐振现象。调相机采用 V2 固态协调型静止励磁系统，如图 2 所示；系统参数见表 1 和表 2。

表 1 调相机并网基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the synchronous compensator

基本参数	数值
电机额定电压 U/kV	7.91
电机额定电流 I/kA	7.08
转子惯性时间常数 T/s	1.988
系统工频 f/Hz	50
系统电压等级/kV	230
变压器电抗百分比/%	10

考虑同步调相机 U_{ref}=1 p.u.、K=10，基于式(3)~式(8)可得同步调相机整体阻抗模型为

$$\boldsymbol{Z}_{dq}=\left\{\boldsymbol{C}(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\left[\boldsymbol{B}_1-\frac{K(1+sT_A)(1-sT_1)}{(1+sT_E)(1+sT_1)^2(1+sT_B)}\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{U}\right]\right\}^{-1} \tag{12}$$

基于式(9)可得同步调相机正、负序阻抗模型，分别如图 3 和图 4 所示。首先基于式(11)和式(12)计算采用线性励磁模型和自并励静止励磁模型的调相机阻抗矩阵；然后作为对比分析，仅保留图 2 中的励磁模块，并建立线性励磁模型；接着联立式(5)~式(9)得到同步调相机整体阻抗模型；最后，基于 PSCAD/EMTDC 建立同步调相机电磁暂态仿真模型，并通过扫频得到调相机阻抗。

对比图 3 和图 4 可知：基于所提建模方法得到的同步调相机阻抗模型与扫频结果基本一致，验证

了所提方法的有效性；采用简化励磁模型所得结果无法准确反映采用自并励静止励磁系统时，调相机工频附近的阻抗特性。

表 2　励磁系统及调相机绕组参数

Tab. 2 Parameters of the excitation system and compensator windings

参数	数值
定子电阻 R_a(p.u.)	0.002 5
d 轴阻尼绕组电阻 R_D(p.u.)	0.023 1
励磁绕组电阻 R_f(p.u.)	0.004 2
q 轴阻尼绕组电阻 R_Q(p.u.)	−0.025 0
g 绕组电阻 R_g(p.u.)	0.005 2
滤波时间常数 T_1/s	0.001
励磁时间常数 T_E/s	0.065
自动电压调节器放大时间常数 T_A/s	0.1
自动电压调节器超前滞后时间常数 T_B/s	0.2
d 轴同步电抗 x_d(p.u.)	1.560
q 轴同步电抗 x_q(p.u.)	1.560
d 轴暂态电抗 x'_d (p.u.)	0.300
q 轴暂态电抗 x'_q (p.u.)	0.228
d 轴次暂态电抗 x''_d (p.u.)	0.280
q 轴次暂态电抗 x''_q (p.u.)	0.230
d 轴电枢反应电抗 x_{ad}(p.u.)	1.360
q 轴电枢反应电抗 x_{aq}(p.u.)	1.360
d 轴暂态开路时间常数 T'_{d0}/s	1.100
q 轴暂态开路时间常数 T'_{q0}/s	0.850
d 轴次暂态开路时间常数 T''_{d0}/s	0.059
q 轴次暂态开路时间常数 T''_{q0}/s	0.050

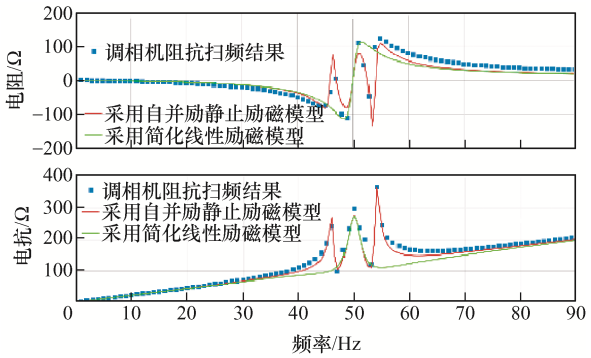


图 3　230 kV 电压等级下处于额定工况的同步调相机正序阻抗

Fig. 3 Positive sequence impedance of the synchronous compensator at rated operating condition at 230 kV voltage level

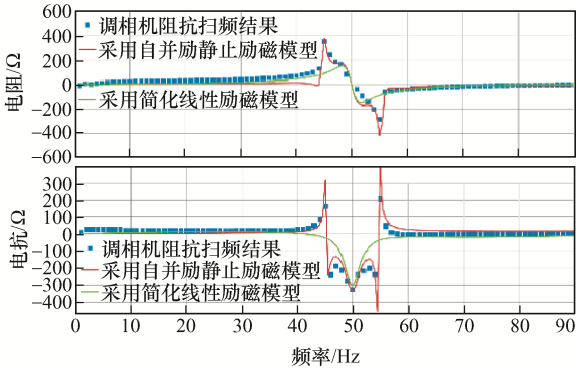


图 4　230 kV 电压等级下处于额定工况的同步调相机负序阻抗

Fig. 4 Negative sequence impedance of the synchronous compensator at rated operating condition at 230 kV voltage level

为进一步验证励磁系统对调相机阻抗特性的影响，构建恒压励磁方式下同步调相机阻抗模型，所得结果如图 5 所示。

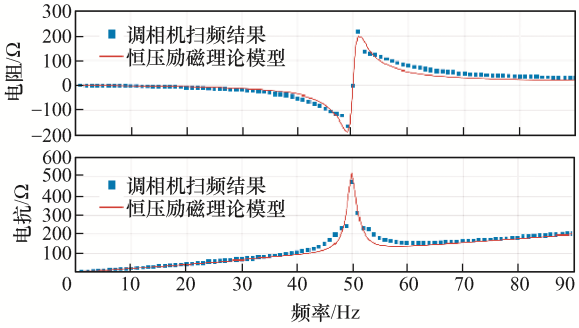


图 5　230 kV 电压等级下处于恒压励磁方式的同步调相机正序阻抗

Fig. 5 Positive sequence impedance of the synchronous compensator in constant voltage excitation mode at 230 kV voltage level

分析图 5 可知，恒压励磁方式下调相机工频处存在峰值特征。从数值上看，阻抗基值为 350.8 Ω，由表 2 绕组参数可知：远离工频时调相机阻抗表现为超暂态电抗特征；工频处电抗为调相机同步电抗。如果忽略工频处的变化，可以用恒电抗模型来表示调相机在大部分频段的阻抗特性。

工频附近形成阻抗峰值的原因在于，其在 dq 坐标系下处于低频段，此时调相机电抗较小，各绕

组电阻不可忽略。在仿真中将各绕组电阻设置为 0，则工频峰值消失，调相机阻抗与恒电抗模型完全一致，如图 6 所示，其中实线表示采用表 2 电阻参数的仿真结果，虚线表示采用零电阻的仿真结果。恒电抗模型在远离工频区域虽然准确简便，但无法解释近工频区域的阻抗峰值及过渡过程。需要注意的是，在第 2.4 节中提到，工频附近励磁增益亦不可忽略，但其与上述绕组电阻有本质不同：绕组电阻是导致调相机在工频附近过渡到峰值(同步电抗)的主要原因；而励磁增益则起到了降低此峰值的作用。

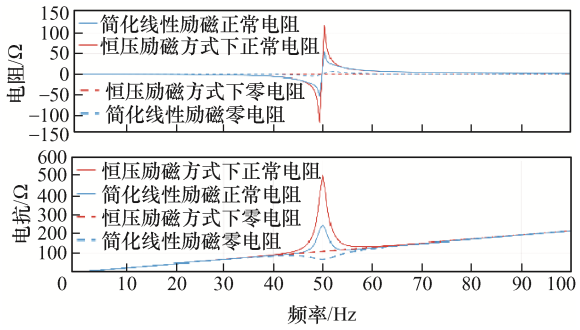


图 6 绕组电阻对同步调相机阻抗影响对比

Fig. 6 Comparison of the effect of winding resistance on the impedance of synchronous compensator

对比图 3~图 6 可知：励磁系统会造成同步调相机工频附近的阻抗明显减小(如 50 Hz 处正序电抗峰值约由 500 Ω 降为 300 Ω)，而远离工频后，恒压励磁与各类励磁控制策略下的调相机阻抗相同，印证了第 2.4 节中分析的励磁系统影响随频率远离工频而衰减的结论；采用自并励静止励磁系统时，调相机工频附近约±5 Hz 范围内阻抗特性发生明显改变，正、负序阻抗出现多个峰值，不可采用简化模型。

4 结论

本文提出了考虑励磁响应的同步调相机阻抗建模方法，所得主要结论如下。

(1)励磁系统可以明显减小同步调相机工频附近的阻抗，远离工频后励磁系统的影响快速衰减；自并励静止励磁系统还会改变工频附近的正、负序阻抗特性，使之呈多峰状态。

(2)本文所提调相机建模方法可准确描述采用自并励静止励磁系统的同步调相机阻抗特性，尤其是工频附近的多峰特性。简化励磁模型因其增益单调衰减的特点，无法准确描述自并励静止励磁系统增益在工频附近的非单调、存在过零点等复杂特性。

参考文献：

[1] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61-69.
Shu Yinbiao, Chen Guoping, He Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69. (in Chinese)

[2] 刘纯, 赵牧驰, 汪海蛟, 等. 新能源同步发电机序阻抗建模及其对宽频振荡的抑制作用[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3595-3603.
Liu Chun, Zhao Muchi, Wang Haijiao, et al. Modelling of sequence impedance of renewable energy synchronous generator and its suppression effect on broadband oscillation [J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3595-3603. (in Chinese)

[3] Liu Huakun, Xie Xiaorong, He Jingbo, et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4708-4720.

[4] 金一丁, 于钊, 李明节, 等. 新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2095-2102.
Jin Yiding, Yu Zhao, Li Mingjie, et al. Comparison of new generation synchronous condenser and power electronic reactive-power compensation devices in application in UHV DC/AC grid [J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2095-2102. (in Chinese)

[5] Igbinovia F O, Fandi G, Müller Z, et al. Optimal location

of the synchronous condenser in electric-power system networks [C]// 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Prague, Czech Republic, 2016: 1-6.

[6] Zhou Yingkun, Sun Huadong, Wang Xiaoli, et al. Suppressing overvoltage by synchronous condenser based on multiple renewable energy stations short circuit ratio (MRSCR) [C]// 2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Taiyuan, China, 2022: 918-923.

[7] Li Wenhua, Du Ning, Xiang Zutao. Research on damping control strategy for distributed synchronous condensers to suppress the subsynchronous oscillation caused by new energy [C]// 2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Tianjin, China, 2023: 2308-2312.

[8] 刘威, 段荣华, 谢小荣, 等. 直驱风电机组频率耦合阻抗模型的辨识[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2868-2874.
Liu Wei, Duan Ronghua, Xie Xiaorong, et al. Identification of frequency-coupled impedance model for direct-drive wind turbine [J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2868-2874. (in Chinese)

[9] 蔡晖, 郭瀚临, 张文嘉, 等. 电力电子化受端省级电网宽频谐振稳定性研究[J]. 电源学报, 2024, 22(S1): 159-165, 207.
Cai Hui, Guo Hanlin, Zhang Wenjia, et al. Research on broadband resonance stability of receiving-end provincial power grid with high penetration of power electronic devices [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(S1): 159-165, 207. (in Chinese)

[10] Huang Jing, Corzine K A, Belkhayat M. Online synchronous machine parameter extraction from small-signal injection techniques [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(1): 43-51.

[11] 高磊, 马骏超, 吕敬, 等. 基于频域模态法的新能源电力系统振荡稳定性评估[J]. 上海交通大学学报, 2025, 59(6): 821-835.
Gao Lei, Ma Junchao, Lü Jing, et al. Oscillatory stability assessment of renewable power systems based on frequency-domain modal analysis [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2025, 59(6): 821-835. (in Chinese)

[12] 李佳龙, 卢新宇, 杜雄, 等. 考虑轴系特性的汽轮发电机阻抗模型[J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4767-4781.
Li Jialong, Lu Xinyu, Du Xiong, et al. Impedance model of turbo-generator considering torsional characteristics of shafting [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4767-4781. (in Chinese)

[13] 徐韵扬. 振荡频率耦合下风电机组的阻抗建模与并网稳定性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
Xu Yunyang. Impedance modeling and stability analysis of the grid-connected wind turbine system under frequency-coupled oscillations [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)

[14] 曾雨晨. 基于阻抗建模的双馈风力发电机稳定性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
Zeng Yuchen. Research on stability analysis of double fed induction generator based on impedance modeling [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018. (in Chinese)

[15] Zhao Wei, Wang Shihao, Sun Xiaofeng, et al. Impedance modeling and stability research of hybrid parallel system with synchronous generator and inverters [C]// 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC). Shenzhen, China, 2018: 1-6.

[16] Kundur P, Balu E J, et al. Power System Stability and Control [M]. New York: McGraw-Hill, 1994.

[17] Anderson P M, Fouad A A. Power System Control and Stability [M]. 2nd ed. Piscataway: IEEE Press, 2002.

[18] Wang Yuzhi, Wang Liang, Jiang Qirong. Impact of synchronous condenser on sub/super-synchronous oscillations in wind farms [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2075-2084.

[19] 李汉儒, 李宝山, 赵冬云. 自并励静止励磁系统在发电厂励磁系统改造中的应用[J]. 冶金动力, 2014(12): 5-8.
Li Hanru, Li Baoshan, Zhao Dongyun. Application of

self-shunt static excitation device in reconstruction of the excitation system of power plant [J]. Metallurgical Power, 2014(12): 5-8. (in Chinese)

[20] Schaefer R C. Applying static excitation systems [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 1998, 4(6): 41-49.

[21] Schaefer R C. Retrofitting static exciter regulators for rotating exciter systems [C]// Conference Record of Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. Atlanta, GA, USA, 2002: 1-7.

[22] 赵静波, 周前, 杨文莉, 等. 阻抗测量的扰动电压自适应控制策略[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 111-119.
Zhao Jingbo, Zhou Qian, Yang Wenli, et al. Adaptive control strategy of disturbance voltage for impedance measurement [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 111-119. (in Chinese)



李华

作者简介：

李华(1986—)，女，博士，高级工程师。研究方向：电力系统规划。E-mail：lh_jy@ln.sgcc.com.cn。

陆明璇(1996—)，女，硕士，助理工程师。研究方向：电力系统规划。E-mail：2870525679@qq.com。

李汶铮(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：电力系统稳定性分析与控制。E-mail：1660770123@qq.com。

董文凯(1992—)，男，通信作者，博士，助理研究员。研究方向：电力系统稳定性分析与控制。E-mail：596167281@qq.com。

韩震焘(1986—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：配电网规划。E-mail：hrclark@163.com。

谢小荣(1975—)，男，博士，教授。研究方向：电力系统稳定性分析与控制。E-mail：xiexr@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑：耿越)

(上接第 19 页)

and analysis for spectrum characteristics parameters of switching device for reduced EMI generation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 5444-5454.

[20] Sun Pengju, Gong Can, Du Xiong, et al. Condition monitoring IGBT module bond wires fatigue using short-circuit current identification [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3777-3786.



李亚辉

作者简介：

李亚辉(1999—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：电力电子器件可靠性。E-mail：l20184331@126.com。

杜明星(1980—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，教授。研究方向：电力电子器件可靠性。E-mail：dumx@tjut.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)