

同步调相机次/超同步阻抗建模方法与特性分析

李文铮¹, 董文凯¹, 贾祺², 韩子娇², 屈超², 谢小荣¹

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100080;

2. 国家电网辽宁省电力有限公司, 辽宁省 沈阳市 110000)

Modeling Method and Analysis of Sub/Super-synchronous Impedances of Synchronous Condensers

LI Wenzheng¹, DONG Wenkai¹, JIA Qi², HAN Zijiao², QU Chao², XIE Xiaorong¹

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100080, China;

2. State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Shenyang 110000, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: The configuration of synchronous condensers is currently a commonly used measure to enhance the oscillatory stability of renewable energy integration systems. However, there is limited research on the mechanism of frequency-coupled impedance in synchronous condensers. Discrete numerical solutions for the frequency-coupled impedance of synchronous condensers can only be obtained through frequency-sweep measurements or programmatic calculations. The internal mechanism of the condenser impedance model remains unclear, posing numerous limitations to studies on sub/super-synchronous oscillation suppression in power grids using impedance analysis methods. To address this, this paper proposed an analytical method for the impedance of synchronous condensers. Based on the analytical results, the study analyzed the decisive parameters affecting the external impedance characteristics at the mechanistic level, providing research insights for the oscillatory stability analysis of regional power grids with synchronous condensers and additional damping control methods.

KEY WORDS: synchronous condenser; sub/super-synchronous oscillation; impedance analysis method; impedance model

摘要: 同步调相机配置是目前常用的新能源接入系统振荡稳定提升措施。但目前对于调相机次/超同步阻抗的阻抗建模与特性分析研究较少, 只能通过扫频测量或程序计算得到频域阻抗的离散数值解, 内部机理并不明确, 给基于阻抗分析法的调相机抑制电网次/超同步振荡研究带来诸多限制。为此, 提出了一种同步调相机阻抗解析方法, 并基于解析结果, 在机理层面分析了调相机各参数对其阻抗特性的影响, 为含同步调相机的区域电网振荡稳定性分析及附加阻尼控制方

法提供研究思路。

关键词: 同步调相机; 次/超同步振荡; 阻抗分析法; 阻抗模型

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0041

0 引言

同步调相机是一类特殊的同步机, 在电网中起无功支撑的作用, 大量研究与工程经验表明其可以有效提升新能源接入弱电网系统的振荡稳定性^[1-8]。目前新能源并网系统振荡分析与抑制普遍基于阻抗模型开展; 建立物理意义清晰的调相机阻抗模型, 是开展振荡评估与防控的基础^[9]。

在诸多次/超同步振荡分析方法中, 阻抗分析法无论是在振荡机理分析还是高维复杂系统计算方面都具备明显优势^[10-14]。该方法需要建立系统各元件的小信号频域阻抗模型^[15-16], 进而根据奈奎斯特判据等指标分析系统稳定性^[11,17]。目前静止无功发生器(static var generator, SVG)、储能等电力电子设备的阻抗建模方法已趋于成熟, 但针对调相机的建模研究仍不够完善, 缺少解析化的阻抗模型。通过仿真或实验测量的阻抗数值结果虽能用于分析系统阻抗^[10], 但只能针对离散工况进行, 且调相机阻抗模型内部机理不明确, 难以分析电机绕组或励磁系统参数以及工况变化对系统振荡稳定性的影响, 不利于进一步采用调相机抑制振荡的研究。

目前已有研究提出了同步机小信号阻抗建模方法^[18-20], 据此可直接计算调相机阻抗的数值结果。文献[21]认为调相机稳态下 d 轴电压 u_d 与 q 轴电流 i_q 为零, 在此基础上提出了一种解析化的建模方法。但该研究推导的解析结果实际是调相机频率耦合阻抗矩阵中的 Z_{qd} 项(即 Δu_q 对 Δi_d 的阻抗), 缺

基金项目: 国家自然科学基金项目(52321004); 国家电网有限公司科技项目(SGLN0000FZJS2400563)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52321004); Science & Technology Project of State Grid Corporation of China (SGLN0000FZJS2400563).

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

在式(6)(7)基础上将 Y_{dq} 分解为两矩阵相乘的形式, 左、右矩阵 L 、 R 形式如下:

$$\begin{cases} Y_{dq} = LR \\ L = C_1^T A^{-1} \\ R = (sI - M)^{-1} C_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: 矩阵 R 元素数值与调相机参数无关, 详细表达式如式(11)所示:

$$R = (sI - M)^{-1} C_1 = \frac{1}{1+s^2} \begin{bmatrix} s & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & s \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

由式(2), 矩阵 A 的逆矩阵可写作:

$$A = \begin{bmatrix} X_d & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & X_q \end{bmatrix}; A^{-1} = \begin{bmatrix} X_d^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & X_q^{-1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(12)中, 子矩阵 X_d 与 X_q 完全对偶, 二者及其逆矩阵形式如下:

$$X_d = \begin{bmatrix} -x_d & x_{ad} & x_{ad} \\ -x_{ad} & x_f & x_{ad} \\ -x_{ad} & x_{ad} & x_D \end{bmatrix}; X_q = \begin{bmatrix} -x_q & x_{aq} & x_{aq} \\ -x_{aq} & x_g & x_{aq} \\ -x_{aq} & x_{aq} & x_Q \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$X_d^{-1} = [d_{ij}]_{3 \times 3}; X_q^{-1} = [q_{ij}]_{3 \times 3} \quad (14)$$

式中: d_{ij} 与 q_{ij} 分别表示矩阵 X_d^{-1} 、 X_q^{-1} 位置 (i,j) 上的元素。导纳矩阵 Y_{dq} 的 L 可表示为

$$L = C_1^T A^{-1} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{11} & q_{12} & q_{13} \end{bmatrix} \quad (15)$$

联立式(11)和式(15)可得同步调相机频率耦合导纳/阻抗矩阵表达式:

$$Y_{dq} = LR = \frac{1}{1+s^2} \begin{bmatrix} d_{11}s & d_{11} \\ -q_{11} & q_{11}s \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$Z_{dq} = Y_{dq}^{-1} = \frac{1}{d_{11}q_{11}} \begin{bmatrix} q_{11}s & -d_{11} \\ q_{11} & d_{11}s \end{bmatrix} \quad (17)$$

综上所述, 矩阵 Z_{dq} 的表达式只与 d_{11} 、 q_{11} 有关, 而二者又分别是对偶矩阵 X_d^{-1} 与 X_q^{-1} 的首位元素, 形式一致。基于该矩阵处理方法, 可以将原本 6 维矩阵求逆乘法运算简化为求解 3 维逆矩阵的首元

素, 运算复杂度大幅下降。

d_{11} 、 q_{11} 的求逆过程及式中参数含义见附录 B, 在忽略电阻的条件下, 二者表达式如下:

$$d_{11} = \frac{x_{ad}x_{Dl} + x_{Dl}x_{fl} + x_{ad}x_{fl}}{x_{ad}x_p(x_{fl} + x_{Dl}) + x_{fl}x_{Dl}(x_{ad} + x_p)} = \frac{1}{x_d''} \quad (18)$$

$$q_{11} = \frac{x_{aq}x_{Ql} + x_{Ql}x_{gl} + x_{aq}x_{gl}}{x_{aq}x_p(x_{gl} + x_{Ql}) + x_{gl}x_{Ql}(x_{aq} + x_p)} = \frac{1}{x_q''} \quad (19)$$

式中: x_{fl} 、 x_{Dl} 、 x_{gl} 、 x_{Ql} 均满足:

$$x_{il} = x_i - x_{ad}, \quad i \text{ 取 } f, D, g, Q \quad (20)$$

f 、 D 、 g 、 Q 为各绕组名。通过式(5)坐标变换及频率换元, 可以得到 abc 坐标系下同步调相机阻抗矩阵 Z_{abc} 。以矩阵首位元素 Z_{11} 为例计算频率耦合阻抗模型:

$$Z_{11} = \frac{d_{11} + q_{11}}{2d_{11}q_{11}}(s - \omega_0 j + j) = \frac{x_d'' + x_q''}{2}s \quad (21)$$

由于在远离工频的大部分频段, 调相机绕组电阻远小于电抗值, 因此可直接用式(7)中的矩阵 B' 替代矩阵 B , 调相机模型也可由式(21)对应的次暂态电抗模型表示。

2.2 工频附近调相机阻抗模型修正

在接近工频的频段内, dq 坐标系下 s 较小, 电阻相较于电抗不可忽略。此时矩阵 B 对角元素非零, A 、 B 不再具备式(7)所示的关系。

本节沿用式(6)结构, 在 $(sA - B)^{-1}$ 运算中将矩阵 B 的电阻项(即对角元素)移至矩阵 sA 中, 以此实现对电阻的修正。由于定子电阻相较于其他绕组电阻可以忽略, 因此 A' 可以写作:

$$A' = \begin{bmatrix} -x_d & x_{ad} & x_{ad} & & & \\ -x_{ad} & x_f + R_f/s & x_{ad} & & & \\ -x_{ad} & x_{ad} & x_D + R_D/s & & & \\ & & & -x_q & x_{aq} & x_{aq} \\ & & & & & \mathbf{0} \\ & & & \mathbf{0} & -x_{aq} & x_g + R_g/s & x_{aq} \\ & & & & -x_{aq} & x_{aq} & x_Q + R_Q/s \end{bmatrix} \quad (22)$$

此时 A' 、 B' 关系与式(7)一致, 即

$$B' = MA' \quad (23)$$

此后矩阵处理方法与 2.1 节相同。 A' 的对偶子矩阵求逆时, 将式(18)(19)中 x_{il} 替换为 $x_{il} + R_i/s$ 即可 (i 为绕组名称, 取 f 、 g 、 D 、 Q)。需要注意的是, 在替换相关绕组电抗 $x_{fl} - x_{Ql}$ 后, d_{11} 与 q_{11} 不再满足式(18)(19)的形式, 而是:

$$d_{11} = \frac{x_{ad}(x_{Dl} + x_{fl} + \frac{R_D + R_f}{s}) + (x_{Dl} + \frac{R_D}{s})(x_{fl} + \frac{R_f}{s})}{x_{ad}x_p(x_{fl} + x_{Dl} + \frac{R_D + R_f}{s}) + (x_{fl} + \frac{R_f}{s})(x_{Dl} + \frac{R_D}{s})(x_{ad} + x_p)} \quad (24)$$

$$q_{11} = \frac{x_{aq}(x_{Ql} + x_{gl} + \frac{R_Q + R_g}{s}) + (x_{Ql} + \frac{R_Q}{s})(x_{gl} + \frac{R_g}{s})}{x_{aq}x_p(x_{gl} + x_{Ql} + \frac{R_Q + R_g}{s}) + (x_{gl} + \frac{R_g}{s})(x_{Ql} + \frac{R_Q}{s})(x_{aq} + x_p)} \quad (25)$$

由式(20)及坐标频率变换后, Z_{11} 解析表达式为

$$Z_{11} = \frac{s}{2} \left(\frac{x_{ad}x_p(x_{fl} + x_{dl} + \frac{R_D + R_f}{s-j}) + (x_{fl} + \frac{R_f}{s-j})(x_{dl} + \frac{R_D}{s-j})(x_{ad} + x_p)}{x_{ad}(x_{fl} + x_{fl} + \frac{R_D + R_f}{s-j}) + (x_{fl} + \frac{R_f}{s-j})(x_{dl} + \frac{R_D}{s-j})} + \frac{x_{aq}x_p(x_{gl} + x_{Ql} + \frac{R_Q + R_g}{s-j}) + (x_{gl} + \frac{R_g}{s-j})(x_{Ql} + \frac{R_Q}{s-j})(x_{aq} + x_p)}{x_{aq}(x_{Ql} + x_{gl} + \frac{R_Q + R_g}{s-j}) + (x_{Ql} + \frac{R_Q}{s-j})(x_{gl} + \frac{R_g}{s-j})} \right) \quad (26)$$

式中: j 为虚数符号, 在工频处即 $s=j$ 时, Z_{11} 取极限为

$$\lim_{s \rightarrow j} Z_{11} = \frac{j}{2} (x_d + x_q) \quad (27)$$

从物理意义方面分析, 在工频处调相机阻抗由同步电抗决定; 在远离工频时, 由于绕组电阻可以忽略, 调相机阻抗可等效为式(21)的形式, 即由次暂态电抗决定。工频周围的阻抗“过渡阶段”则可由式(26)表示, 随着频率接近工频, 电抗逐渐增大, 电阻也有较大波动。

2.3 考虑励磁系统控制策略的阻抗解析结果

在考虑励磁调节控制策略后, 调相机频率耦合阻抗模型表达式修正如下, 推导过程见附录 A。

$$\mathbf{Z}_{dq} = (\mathbf{C}_1^T (s\mathbf{I} - \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})^{-1} \mathbf{A}^{-1} (\mathbf{C}_1 - G(s)\mathbf{C}_2\mathbf{U}))^{-1} \quad (28)$$

式中: $G(s)$ 为励磁调节器传递函数, 其输入信号为机端电压 u , 输出信号为励磁电压 u_f , 且:

$$\mathbf{C}_2 = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (29)$$

此时调相机频率耦合阻抗矩阵仅在式(1)基础上对右侧 \mathbf{C}_1 做了修正, 添加了 \mathbf{C}_2 、励磁传递函数 $G(s)$ 与稳态电压向量 $\mathbf{U} = [u_q \ u_d]^T$, 因此 2.1—2.2 节中所提矩阵处理过程依然适用。考虑励磁控制策略后, 式(10)中右侧矩阵 \mathbf{R} 的形式由式(11)修正为

$$\mathbf{R} = (s\mathbf{I} - \mathbf{M})^{-1} (\mathbf{C}_1 - G(s)\mathbf{C}_2\mathbf{U}) = \frac{1}{1+s^2} \begin{bmatrix} s & 1 \\ -(s+\frac{1}{s})G(s)u_d & -(s+\frac{1}{s})G(s)u_q \\ 0 & 0 \\ -1 & s \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

后续处理思路与式(15)—(26)过程相同, 调相机阻抗 Z_{11} 解析式为

$$Z_{11} = \frac{1}{2} \frac{(d_{11} + q_{11})s(s-j) + s(s-2j)d_{12}H(s)(u_d + ju_q)}{d_{11}q_{11}(s-j) + q_{11}d_{12}H(s)((s-j)u_d + u_q)} \quad (31)$$

式(31)中 $H(s)$ 为 $G(s)$ 在 dq -abc 坐标变换后对应的励磁传递函数。在对调相机阻抗进行分析时, 稳态电压向量 \mathbf{U} 可以取电压 $u_d=0$, $u_q=1\text{pu}$ 。 d_{12} 需要求逆, 过程见附录 B, 结果为

$$d_{12} = \frac{1}{x_{fl} + R_f / s} (1 - x_p d_{11}) \quad (32)$$

3 同步调相机频率耦合阻抗特征分析

3.1 绕组阻抗对调相机阻抗影响分析

调相机常用于改善低短路比地区的电网强度, 进而达到抑制振荡的目的。此前对调相机阻抗特性的研究通常基于“黑盒”模型展开, 并没有从解析角度分析电机内部参数对阻抗外特性的影响, 不利于实际工程中调相机的合理选型与控制器参数整定。本节根据解析推导结果, 定量分析电机参数对调相机整体阻抗的影响。由 2.1—2.2 节对恒压励磁调相机阻抗解析结果可以发现。

1) 调相机在远离工频时可以等效为次暂态电抗模型, 其阻抗值为

$$Z_{11} = \frac{s}{2} (x_d'' + x_q'') \quad (33)$$

式中: $s=j\omega$, j 为虚数符号。

在远离工频时, 调相机本身对外不表现出电阻特性, 而是以小电抗的形式参与提高地区电网强度。因此在分析次/超同步振荡时可以直接用次暂态电抗表示调相机模型。

2) 调相机阻抗在工频附近出现阻抗峰值是源于绕组电阻的影响。

分析式(26)可以发现, $R_f/(s-j)$ 项在靠近工频时逐渐由可忽略项转变为无穷大项, 这导致阻抗模型的主导因素由电机电抗快速转变为绕组电阻。同时, 电机电抗与电阻的比值也会影响调相机阻抗峰值的影响范围, 当该比值增大时, 工频附近的峰值范围会相应缩小。

式(27)为调相机在工频处的小信号阻抗值, 从物理意义来看也是其戴维南模型中的等效阻抗。从中可以发现, 该阻抗在工频处的峰值电抗仅受到电机同步电抗影响。因此式(27)也可以在工频周围的区域为阻抗模型提供参考: 电机同步电抗影响工频阻抗峰值的大小, 次暂态电抗影响远离工频的大部

分频段调相机等效电抗水平；在此基础上，绕组电阻会影响调相机工频周围峰状阻抗的范围，当绕组电阻较小时，峰状阻抗变窄。

3.2 励磁调节策略对调相机阻抗影响

在恒压励磁方式下调相机阻抗的基础上，对励磁系统加入适当控制策略，使其能够维持电机端电压稳定。若认为调相机稳态参数 $u_d=0, u_q=1$ pu，则此时式(31)可变为如下形式：

$$Z_{11} = \frac{1}{2} \frac{(d_{11} + q_{11})s + \frac{js(s-2j)H(s)d_{12}}{s-j}}{q_{11}d_{11} + \frac{q_{11}d_{12}H(s)}{s-j}} \quad (34)$$

$H(s)$ 对应励磁系统的传递函数，其特点在于，当频率远离工频后，励磁总增益会快速衰减至 0，因此在远离工频区域励磁调节器的影响可以忽略。

本节主要讨论 $H(s)$ 对调相机工频周围阻抗特性的影响。在远离工频区域， $H(s)$ 为 0，此时式(34)分子、分母均由左半部分主导；当频率靠近工频时， $1/(s-j)$ 项趋于无穷，此时分子、分母均由右半部分主导。对不同频段的阻抗解析结果进行化简可得。

远离工频时 Z_{11} 由左半部分主导，结果为

$$Z_{11} = \frac{s}{2} \left(\frac{1}{d_{11}} + \frac{1}{q_{11}} \right) = \frac{s}{2} (x_d'' + x_q'') \quad (35)$$

式(35)与 3.1 节恒压励磁模式下的解析结果相同，符合上文分析。当靠近工频时，式(34)由右半部分主导，在工频处取极限有：

$$Z_{11} = \frac{j}{2} \frac{1}{q_{11}} = \frac{x_q}{2} j \quad (36)$$

对比式(27)、式(36)可以发现，在考虑励磁调节器的影响后，工频处的 d 轴电抗被抵消了，这意味着相较于恒压励磁方式而言，励磁调节器的参与，会导致工频周围的峰值明显降低。

式(34)表示的工频周围阻抗过渡过程，可以认为是阻抗模型 Z_{11} 由式(35)向式(36)转变的过程，励磁传递函数 $H(s)$ 会对这一过程产生影响，但并不会改变起点、终点的阻抗值。

4 算例验证

4.1 时域仿真方法及模型参数介绍

本文基于电磁暂态仿真对调相机阻抗模型进行扫频测量，通过与理论分析结果对比来验证所提方法的有效性。首先搭建电磁暂态仿真模型，然后在机端施加不同频率的小信号电压扰动，测量三相电压、电流值，测试电路如图 2 所示。最后对测量值进行滤波、相量检测等信号分析来辨识调相机的

频率耦合阻抗。

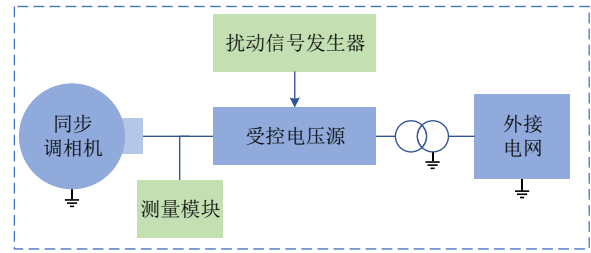


图 2 同步调相机阻抗扫频测量电路

Fig. 2 Frequency scanning measurement circuit for impedance model of the synchronous condensers

为验证此前所提方法及分析结论的有效性，在 PSCAD 仿真平台搭建了同步调相机并网系统的电磁暂态仿真模型。其中调相机参数如表 1—2 所示。

表 1 调相机并网基本参数
Table 1 Basic parameters of the synchronous compensator

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

表 2 调相机绕组参数
Table 2 Parameters of the compensator windings

参数	数值	单位	参数	数值	单位	参数	数值	单位
R_a	0.0025	pu	R_D	0.0231	pu	R_f	0.0042	pu
R_Q	-0.0250	pu	R_g	0.0052	pu	T_{d0}	1.100	s
x_d	1.56	pu	x'_d	0.300	pu	T_{q0}	0.850	s
x_q	1.56	pu	x'_q	0.228	pu	T'_{d0}	0.034	s
x_{ad}	1.36	pu	x''_d	0.280	pu	T'_{q0}	0.030	s
x_{aq}	1.36	pu	x''_q	0.230	pu			

4.2 调相机阻抗模型构建

1) 解析方法与现有建模方法对比。

首先将本文所提调相机阻抗解析结果与目前常用的调相机阻抗“黑盒”模型^[18-20]进行对比。为此以阻抗模型 Z_{11} 为例，利用 MATLAB 计算式(1)—(5)、式(28)对应的“黑盒”模型数值结果，对比结果如图 3 所示。

图 3 中，本文所提调相机阻抗解析模型与目前

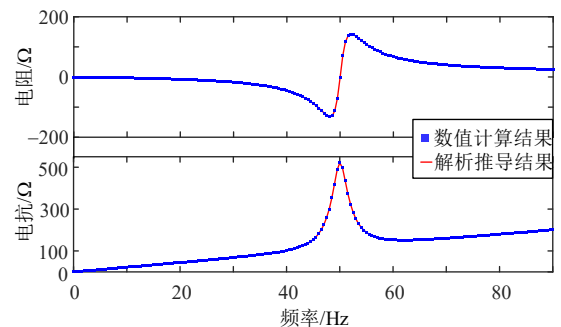


图 3 调相机频率耦合阻抗 Z_{11} 解析与数值计算结果对比
Fig. 3 Comparison of the analyzed and calculated frequency coupling impedance Z_{11} of the synchronous condensers

常用的数值计算结果完全一致，证明了解析方法的合理性。本方法具备分析调相机阻抗内部机理的优势，在阻抗分析时可替代目前常用的建模方法。

2) 解析模型及分析结论的时域验证。

本文通过 4.1 节介绍的电磁暂态仿真模型对调相机阻抗进行测量，并与解析结果进行对比，结果如图 4 所示。

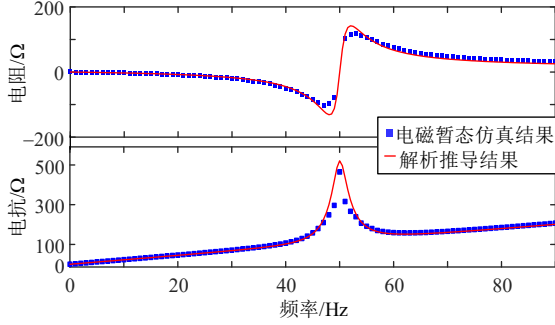


图 4 调相机频率耦合阻抗 Z_{11} 仿真验证结果
Fig. 4 Simulation of the frequency coupling impedance Z_{11}

图 4 中解析结果与仿真结果基本一致，验证了阻抗模型的准确性，证明本文构建的调相机频率耦合阻抗模型可适用于含调相机系统的小扰动稳定性分析。

为验证第 3 节中的分析结论，改变调相机绕组电阻后 Z_{11} 对比结果如图 5 所示。

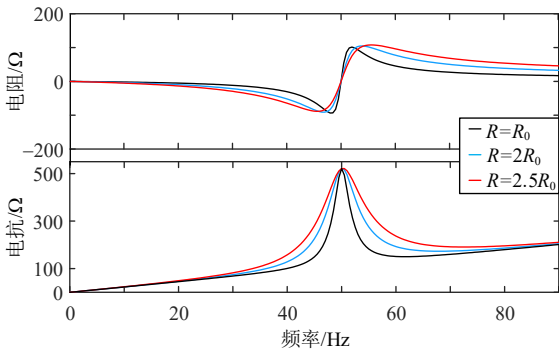


图 5 绕组电阻对调相机阻抗 Z_{11} 的影响
Fig. 5 Comparison of the impedance Z_{11} with different winding resistances

图 5 中 R_0 是指表 2 各绕组电阻参数。由此可见，当电阻增大时，工频周围的峰状电抗影响范围也随之变大，这与 2.2 节中对绕组电阻的分析结论相符。

4.3 励磁系统影响分析

本节采用 IEEE 标准的直流励磁调节器(DC1A)进行仿真，励磁系统框图如图 6 所示。

图中 U_C 为采集端电压信号， U_{ref} 为参考电压值， U_{FD} 为输出的励磁电压，其余参数定义见附录 C。参考[20]中的同步机建模方法，图 6 对应的励磁系统可以简化为式(7)。式中： K_A 、 T_A 为励磁增益与时间常数； u_f 为励磁电压； u_{ref} 为机端电压参考值；

u 为机端电压测量值。

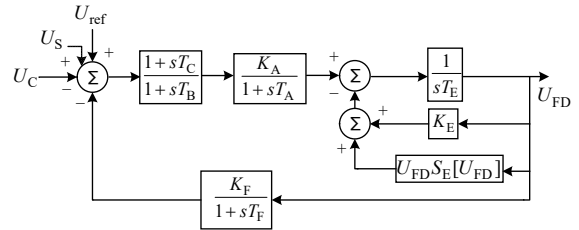


图 6 DC1A 励磁系统传递函数
Fig. 6 Transfer function of DC1A excitation system

$$u_f = \frac{K_A}{1 + sT_A} (u_{ref} - u) \tag{37}$$

微分后 Δu_f 与 Δu_{dq} 之间有如下关系：

$$\Delta u_f = H(s)U\Delta u_{dq} \tag{38}$$

式中 $H(s)$ 形式为

$$H(s) = -\frac{K_A}{1 + sT_A} \tag{39}$$

将 $H(s)$ 表达式代入式(34)进行数值拟合，同时在 PSCAD 模型中加入直流励磁调节器(DC1A)进行电磁暂态仿真，励磁调节器参数如表 3 所示。调相机阻抗模型对比结果如图 7—8 所示。

表 3 励磁调节器基本参数		
Table 3 Basic parameters of the exciter		
基本参数	数值	单位
励磁增益 K_A	46	pu
励磁时间常数 T_E	0.6	s
反馈增益 K_F	0	

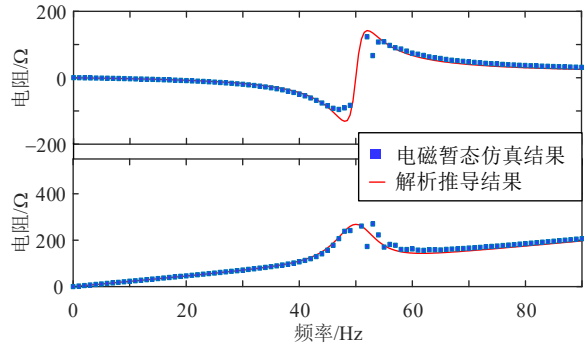


图 7 励磁控制策略对阻抗 Z_{11} 的影响
Fig. 7 Impact of excitation strategy on the impedance Z_{11}

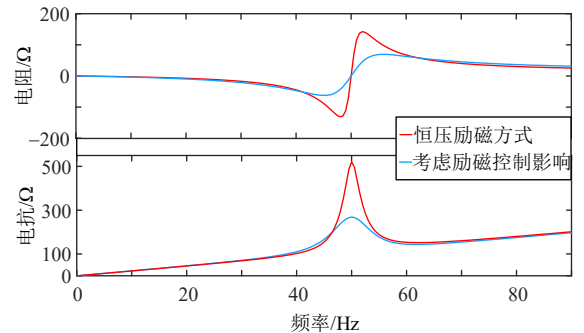


图 8 励磁控制策略对调相机阻抗 Z_{11} 影响对比
Fig. 8 Comparison of the impact caused by excitation strategy on the impedance Z_{11}

由图 7—8 可知当加入励磁调节器后, 调相机正序电抗在工频附近明显降低。而根据 $H(s)$ 特性, 当远离工频后, 励磁控制模块对调相机阻抗的影响消失, 进而验证了 3.2 节对励磁系统作用机理的分析结论。通过额外的控制器设计, 可以实现在其他频段借助励磁系统对调相机阻抗进行调节, 以实现类似变频器主动阻尼控制的效果^[24], 限于篇幅本文不再过多验证。

5 结论

本文提出了一种针对调相机频率耦合阻抗矩阵运算的处理方法, 推导并验证了其解析结果。此外, 本文还分析了电机绕组及励磁系统参数对调相机阻抗的影响, 结论如下:

1) 电机内部电抗决定了调相机频率耦合阻抗值。在大部分频率区间内, 调相机阻抗都可以等效为恒电抗形式, 电抗值由调相机次暂态电抗决定。

2) 绕组电阻大小会影响工频阻抗峰值的频域范围, 当电阻减小时, 工频周围的峰状阻抗会变窄, 影响范围减小, 反之则影响范围增大。

3) 励磁系统在工频处会影响 d 轴电抗作用, 进而降低调相机阻抗值, 在远离工频时, 这种作用会快速衰减。此外, 不同励磁控制策略下远离工频时励磁增益衰减特点不同, 据此可以设计适当的励磁控制器, 使得传递函数在系统振荡频率附近表现为较大增益, 进而改变调相机阻抗特性, 配合移相增益等方法实现对调相机的主动阻尼控制。

附录见本刊网络版 (<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

[1] 祁晓笑, 程静, 王维庆, 等. 基于 SC 的光伏发电并网系统次同步振荡抑制方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(5): 88-95.
QI Xiaoxiao, CHENG Jing, WANG Weiqing, et al. Sub-synchronous oscillation suppression of photovoltaic grid-connected system based on SC[J]. Smart Power, 2023, 51(5): 88-95(in Chinese).

[2] WANG Yuzhi, WANG Liang, JIANG Qirong. Mitigation SSOs in PMSG-based wind farms with synchronous condenser[C]//2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2020: 1-5

[3] DU Ning, ZHOU Peipeng, YANG Daye, et al. Research on synchronous condensers to suppress subsynchronous oscillation caused by new energy power generation[C]//2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Chongqing, China: IEEE, 2021: 247-251.

[4] YOUSSEF A, HAMANAH W M, ZAERY M, et al. Frequency stability enhancement using Synchronous condenser and Synthetic Inertia in wind-dominated power grids: a case study[C]//2023 IEEE International Conference on Energy Technologies for Future Grids

(ETFG). Wollongong, Australia: IEEE, 2023: 1-6.

[5] 周煜, 王东阳, 李志强, 等. 基于复合指标的新能源场站分布式调相机优化配置方法[J/OL]. 电网技术, 2024: 1-12[2024-12-29]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1683>.
ZHOU Yu, WANG Dongyang, LI Zhiqiang, et al. Configuration method of distributed synchronous condenser in new energy stations based on composite index[J/OL]. Power System Technology, 2024: 1-12[2024-12-29]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1683>(in Chinese).

[6] 肖洋, 李志强, 李程昊, 等. 新型电力系统需求下大型火电机组改调相机运行涉网性能评价体系建设[J]. 电网技术, 2025, 49(3): 1285-1293.
XIAO Yang, LI Zhiqiang, LI Chenghao, et al. Construction of grid-related performance evaluation system for synchronous condensers retrofitted from large thermal power units under the demand of new power system[J]. Power System Technology, 2025, 49(3): 1285-1293(in Chinese).

[7] 郭强, 李志强. 同步调相机发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 6050-6063.
GUO Qiang, LI Zhiqiang. Summarization of synchronous condenser development[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 6050-6063(in Chinese).

[8] 许国瑞, 胡沛东, 李志强, 等. 不同稳态工况对同步调相机单相短路后暂态温升的影响[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1587-1596.
XU Guorui, HU Peidong, LI Zhiqiang, et al. Influence of different steady state conditions on transient temperature rise of synchronous condenser after single-phase short-circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1587-1596(in Chinese).

[9] 王伟胜, 张冲, 何国庆, 等. 大规模风电场并网系统次同步振荡研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1050-1060.
WANG Weisheng, ZHANG Chong, HE Guoqing, et al. Overview of research on subsynchronous oscillations in large-scale wind farm integrated system[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1050-1060(in Chinese).

[10] 张东辉, 陈新. 基于阻抗视角的新能源发电系统宽频振荡抑制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(24): 9672-9690.
ZHANG Donghui, CHEN Xin. Overview of broadband oscillation mitigation of new energy generation power system based on impedance perspective[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(24): 9672-9690(in Chinese).

[11] 王永杰, 薛静玮, 魏鑫, 等. 限幅参与的双馈风电接入的系统次同步振荡近似阻抗分析[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1917-1925.
WANG Yongjie, XUE Jingwei, WEI Xin, et al. Approximate impedance analysis of subsynchronous oscillation engaged limiters in power system connected with DFIG-based wind power[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1917-1925(in Chinese).

[12] 孙雅旻, 吴林林, 王潇, 等. 双馈直驱风机混合接入 MMC-HVDC 送端系统的次同步振荡特性分析与抑制[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4073-4080.
SUN Yamin, WU Linlin, WANG Xiao, et al. Sub-synchronous oscillation characteristics analysis and suppression of DFIGs and PMSGs mixed access to MMC-HVDC sending-end system[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4073-4080(in Chinese).

[13] 宾子君, 袁宇波, 许璠, 等. 基于故障录波的海上风电机经柔直并网系统阻抗分析方法[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2920-2927.

- BIN Zijun, YUAN Yubo, XU Jin, et al. Impedance analysis of offshore wind farms with VSC-HVDC systems based on fault record data[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2920-2927(in Chinese).
- [14] 李海盼, 年珩, 胡彬, 等. 风电并网系统宽频振荡分析与抑制方法综述[J]. 新型电力系统, 2023, 1(3): 237-255.
LI Haipan, NIAN Heng, HU Bin, et al. Review of analysis and suppression methods for wide-band oscillation in wind power grid-connected systems[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(3): 237-255(in Chinese).
- [15] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 新能源发电并网系统的小信号阻抗/导纳网络建模方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 26-32.
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Small-signal impedance/admittance network modeling for grid-connected renewable energy generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 26-32(in Chinese).
- [16] 刘华坤, 谢小荣, 何国庆, 等. 新能源发电并网系统的同步参考坐标系阻抗模型及其稳定性判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4002-4007, 4278.
LIU Huakun, XIE Xiaorong, HE Guoqing, et al. Synchronous reference frame based impedance model and stability criterion for grid-connected renewable energy generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4002-4007, 4278(in Chinese).
- [17] 赵书强, 李忍, 高本锋. 基于状态空间的阻抗分析法在次同步振荡中的应用[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(18): 25-32, 113.
ZHAO Shuqiang, LI Ren, GAO Benfeng. Application of state space based impedance analysis method in sub-synchronous oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18): 25-32, 113(in Chinese).
- [18] 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).
- [19] 赵牧驰, 汪海蛟, 刘纯, 等. 汽轮机发电机组宽频带阻抗建模及次/超同步振荡分析[J]. 中国电力, 2024, 57(7): 238-246.
ZHAO Muchi, WANG Haijiao, LIU Chun, et al. Broadband impedance modeling and sub/super-synchronous oscillation analysis of steam turbine generator[J]. Electric Power, 2024, 57(7): 238-246(in Chinese).
- [20] LUO S, JIAN Y, GAO Q. Synchronous generator modeling and semi-physical simulation[C]//2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Harbin, China: IEEE, 2019: 1-6.
- [21] 高伟楠. 同步调相机抑制系统次同步振荡的原理与应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.
- [22] GHIMIRE S, KKUNI K V, GUEST E D, et al. Impact of synchronous condensers on small-signal stability of offshore wind power plants[J]. IEEE Access, 2024, 12: 168018-168029.
- [23] 史大雷. 同步调相机接入的双馈风力发电系统次同步振荡抑制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2023.
- [24] 李冠霖. 基于同步调相机的风电场宽频带振荡抑制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2024.



李汶铮

在线出版日期: 2025-04-07。

收稿日期: 2025-01-10。

作者简介:

李汶铮(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: 1660770123@qq.com;
谢小荣(1975), 男, 通信作者, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定性分析与控制, E-mail: xicxr@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 马晓华)

附录 A

A1 同步调相机电磁暂态方程构建及阻抗模型推导

首先在调相机稳态电压、电流关系的基础上，对各物理量进行微分，得到如下方程组：

$$\begin{cases} \Delta\psi_d = -x_d\Delta i_d + x_{ad}\Delta i_f + x_{ad}\Delta i_D \\ \Delta\psi_f = -x_{ad}\Delta i_d + x_f\Delta i_f + x_{ad}\Delta i_D \\ \Delta\psi_D = -x_{ad}\Delta i_d + x_{ad}\Delta i_f + x_D\Delta i_D \\ \Delta\psi_q = -x_q\Delta i_q + x_{aq}\Delta i_g + x_{aq}\Delta i_Q \\ \Delta\psi_g = -x_{aq}\Delta i_q + x_g\Delta i_g + x_{aq}\Delta i_Q \\ \Delta\psi_Q = -x_{aq}\Delta i_q + x_{aq}\Delta i_g + x_Q\Delta i_Q \end{cases} \quad (A1)$$

$$\begin{cases} \Delta u_d = -R_a\Delta i_d + \frac{d}{dt}\Delta\psi_d - \omega_0\Delta\psi_q - \psi_{q0}\Delta\omega \\ \Delta u_q = -R_a\Delta i_q + \frac{d}{dt}\Delta\psi_q + \omega_0\Delta\psi_d + \psi_{d0}\Delta\omega \\ \Delta u_f = R_f\Delta i_f + \frac{d}{dt}\Delta\psi_f \end{cases} \quad (A2)$$

联立式(A1)(A2)可消去磁链微分项。同时由于调相机没有轴系结构， $\Delta\omega$ 项可忽略，最终得到方程组：

$$\begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_f \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 \\ 0 & 0 & R_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Delta i_d \\ \Delta i_f \\ \Delta i_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_d & x_{ad} & x_{ad} \\ x_{ad} & x_f & x_{ad} \\ x_{ad} & x_{ad} & x_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Delta i_d \\ \Delta i_f \\ \Delta i_D \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega_0 x_q & \omega_0 x_{aq} & \omega_0 x_{aq} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Delta i_q \\ \Delta i_g \\ \Delta i_Q \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Delta u_q \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_g & 0 \\ 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Delta i_q \\ \Delta i_g \\ \Delta i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_q & x_{aq} & x_{aq} \\ x_{aq} & x_g & x_{aq} \\ x_{aq} & x_{aq} & x_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Delta i_q \\ \Delta i_g \\ \Delta i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_0 x_d & \omega_0 x_{ad} & \omega_0 x_{ad} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Delta i_d \\ \Delta i_f \\ \Delta i_D \end{bmatrix} \quad (A3)$$

式中： ω_0 为转子角速度，取 1 pu。考虑恒压励磁方式下的调相机阻抗，即认为 u_f 恒定。将各矩阵用符号 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 表示，可写作式(A4)的形式：

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{I} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}\Delta \mathbf{I} + \mathbf{A}^{-1}\mathbf{C}_1\Delta \mathbf{u}_{dq} \\ \Delta \mathbf{i}_{dq} = \mathbf{C}_1\Delta \mathbf{I} \end{cases} \quad (A4)$$

进而根据频率耦合阻抗矩阵的定义，推导传递函数矩阵即可得到调相机频率耦合阻抗在 dq 轴坐标系下的表达式：

$$\mathbf{Z}_{dq} = (\mathbf{C}_1^T(s\mathbf{I} - \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{C}_1)^{-1} \quad (A5)$$

A2 考虑励磁系统影响的调相机频率耦合阻抗修正方法

式(A5)表示的模型并未考虑励磁调节器的影响。端电压的扰动会通过励磁调节模块传递到 u_f 上，进而形成励磁响应 Δu_f ，这种响应与外部电压扰动通常是相反的，因此会抑制端部电压波动，最终影响调相机整体阻抗特性。

首先考虑励磁调节模块的传递函数：

$$u_f = G(s)(u_{ref} - u) \quad (A6)$$

式中： u_{ref} 为端电压参考值； u 为实际端电压。对式(A6)进行微分可得：

$$\Delta u_f = -G(s)\Delta u \quad (A7)$$

端电压可以在 dq 轴进行多元微分，因此为了与式(43)变量一致， Δu 可以写作：

$$\Delta u = \frac{2u_q\Delta u_d + 2u_d\Delta u_q}{2\sqrt{u_d^2 + u_q^2}} = \frac{1}{\sqrt{u_d^2 + u_q^2}} [u_q \quad u_d] \begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{bmatrix} \quad (A8)$$

通常调相机端电压都维持在额定电压处，即认为 $\sqrt{u_d^2 + u_q^2} = 1$ pu，进而式(A7)可以简写为

$$\Delta u_f = -G(s)U\Delta \mathbf{u}_{dq} \quad (A9)$$

式中： $\mathbf{U}=[u_q \quad u_d]$ 为稳态电压向量。

当考虑励磁调节器影响时， Δu_f 非零，从式(A3)整理到式(A4)需要修正为：

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{I} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}\Delta \mathbf{I} + \mathbf{A}^{-1}\mathbf{C}_1\Delta \mathbf{u}_{dq} + \mathbf{A}^{-1}\mathbf{C}_2\Delta u_f \\ \Delta \mathbf{i}_{dq} = \mathbf{C}_1\Delta \mathbf{I} \end{cases} \quad (A10)$$

式中： $\mathbf{C}_2=[0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。由此可以得到 dq 轴旋转坐标系下的调相机频率耦合阻抗矩阵：

$$\mathbf{Z}_{dq} = (\mathbf{C}_1^T(s\mathbf{I} - \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{A}^{-1}(\mathbf{C}_1 - G(s)\mathbf{C}_2\mathbf{U}))^{-1} \quad (A11)$$

需要注意的是，在进行 dq -abc 坐标变换时，式(A11)中 s 应换元为 $s-j\omega_0$ (此处 ω_0 取 1 pu)。因此在调相机频率耦合阻抗矩阵里，励磁控制模块对应的传递函数需改写为

$$H(s) = -G(s-j) \quad (A12)$$

$H(s)$ 即正文中最终采用的励磁控制传递函数形式，其增益通常非正，在工频 $s=j$ 处取得最大值。

附录 B 电抗矩阵的求逆推导

在调相机阻抗模型 Z11 解析过程中，需要对电抗矩阵 \mathbf{X}_d 、 \mathbf{X}_q 进行求逆推导。其中 \mathbf{X}_d 、 \mathbf{X}_q 正文中已经给出，其形式如下：

$$\mathbf{X}_d = \begin{bmatrix} -x_d & x_{ad} & x_{ad} \\ -x_{ad} & x_f & x_{ad} \\ -x_{ad} & x_{ad} & x_D \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X}_q = \begin{bmatrix} -x_q & x_{aq} & x_{aq} \\ -x_{aq} & x_g & x_{aq} \\ -x_{aq} & x_{aq} & x_Q \end{bmatrix}$$

(B1)

观察二者形式可以发现,其各位置上的元素符号具有极强的对偶性,其中 x_d-x_q 、 x_f-x_g 、 x_D-x_Q 以及 $x_{ad}-x_{aq}$ 可以互换。因此只需选择其一进行求逆推导即可。

正文中提到解析推导只需要 \mathbf{X}_d^{-1} 的(1,1)及(1,2)位置元素。本文采用伴随矩阵求逆法:

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{|\mathbf{A}|} \mathbf{A}^* \quad (\text{B2})$$

式中: \mathbf{A}^* 为 \mathbf{A} 的伴随矩阵,其转置矩阵的各元素等于 \mathbf{A} 对应位置的代数余子式。因此只需计算矩阵 \mathbf{A} (1,1)、(2,1)元素对应的代数余子式即可。

$$\left\{ \begin{array}{l} |\mathbf{A}| = -x_q x_f x_D - 2x_{ad}^3 + x_{ad}^2 (x_f + x_d + x_D) \\ d_{11} = \frac{1}{|\mathbf{A}|} (x_f x_D - x_{ad}^2) \\ d_{12} = \frac{1}{|\mathbf{A}|} (x_{ad} x_D - x_{ad}^2) \end{array} \right. \quad (\text{B3})$$

最终可以推导 d_{11} 、 d_{12} 、 q_{11} 的表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{11} = \frac{x_{ad} x_{D1} + x_{D1} x_{f1} + x_{ad} x_{f1}}{x_{ad} x_p (x_{f1} + x_{D1}) + x_{f1} x_{D1} (x_{ad} + x_p)} \\ d_{12} = \frac{x_{ad} x_{D1}}{x_{ad} x_p (x_{f1} + x_{D1}) + x_{f1} x_{D1} (x_{ad} + x_p)} \\ q_{11} = \frac{x_{aq} x_{Q1} + x_{Q1} x_{g1} + x_{aq} x_{g1}}{x_{aq} x_p (x_{g1} + x_{Q1}) + x_{g1} x_{Q1} (x_{aq} + x_p)} \end{array} \right. \quad (\text{B4})$$

式中 x_{f1} 、 x_{D1} 、 x_{g1} 、 x_{Q1} 均满足:

$$x_{i1} = x_i - x_{ad}, \quad i \text{取} f、g、D、Q \quad (\text{B5})$$

整理后可得 d_{12} 与 d_{11} 关系为

$$d_{12} = \frac{1}{x_{f1} + R_f / s} (1 - x_p d_{11}) \quad (\text{B6})$$

附录 C 励磁系统参数定义

正文图6励磁调节器各参数含义如表C1所示。

表 C1 励磁调节器基本参数
Table C1 Basic parameters of the exciter

基本参数	定义
K_A	励磁增益
T_E	励磁时间常数
K_F	反馈增益
$S_E[U_{ED}]$	励磁电压相关饱和函数
T_B	滞后时间常数
T_A	超前时间常数
T_F	反馈时间常数
U_{ref}	机端电压参考值
U_C	机端电压采集值
U_S	电力系统稳定器输入