

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231472

考虑系统稳定边界的同步调相机励磁与升压变参数联合优化

潘学萍¹, 许一¹, 赵天骐², 王宣元³, 谢欢², 郭金鹏¹

(1. 河海大学电气与动力工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院(源网荷储灵活运行与协调控制国家电网公司实验室), 北京 100045; 3. 国网冀北电力有限公司电力调控中心, 北京 100054)

摘要: 现有提升调相机动态无功特性的参数优化方法侧重于电磁参数的优化, 这给生产企业带来较高的工艺要求和较大的成本压力。针对该问题提出考虑系统稳定约束的调相机励磁系统及升压变参数联合优化方法, 分析其对电磁参数优化的可替代性。首先, 推导了基于 Park 模型下调相机的无功频域特性, 与 6 阶实用模型下的无功频域特性对比, 基于调相机的 Park 模型可提升调相机动态无功特性的分析精度。然后, 提出根据调相机并网系统的稳定边界确定参数的优化区间, 采用频域灵敏度方法确定重点参数, 并基于人工鱼群算法进行参数优化。最后, 通过仿真结果表明, 励磁系统与升压变参数的联合优化, 可获得与仅优化电磁参数时相近的调相机动态无功性能, 验证了电磁参数优化的可替代性, 从而降低调相机的制造成本, 扩大同步调相机的应用场合和范围。

关键词: 分布式调相机; 动态无功特性; 参数优化; 无功电流增益; 人工鱼群算法

Joint optimization of parameters of synchronous condenser excitation and step-up transformer considering the stability boundary of the power system

PAN Xueping¹, XU Yi¹, ZHAO Tianqi², WANG Xuanyuan³, XIE Huan², GUO Jinpeng¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute (SGCC Laboratory of Source-Grid-Load-Storage Flexible Operation and Coordinated Control), Beijing 100045, China; 3. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Power Dispatching Center, Beijing 100054, China)

Abstract: Existing parameter optimization methods for a synchronous condenser (SC) to promote its dynamic reactive power characteristics often focus on electromagnetic parameter optimization. This brings high technical requirements and significant cost pressure to manufacturing enterprises. Thus a joint parameter optimization method for the SC excitation system and step-up transformer considering the stability boundary of the power system is proposed, and its substitutability of optimizing electromagnetic parameters is analyzed. First, the reactive power frequency domain characteristics of the SCs are derived based on the Park model. By comparing it with that of the 6th-order practical model, it is found that the Park model can enhance the accuracy of analysis of SC dynamic reactive power characteristics. Then the stability boundary of the SC grid-connected system is analyzed, based on which the parameter optimization range is determined. The frequency domain sensitivity method is applied to determine the key parameters, and the artificial fish swarm algorithm is employed for parameter optimization. Finally, simulation results demonstrate that the joint optimization of SC's excitation and step-up transformer parameters can achieve a similar dynamic reactive power performance of the SC by only optimizing the electromagnetic parameters. This validates the substitutability of electromagnetic parameter optimization, thereby reducing the manufacturing cost of the SCs, and enhancing its scope for application.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077061).

Key words: distributed synchronous condenser; dynamic reactive power characteristics; parameter optimization; reactive current gain; artificial fish swarm algorithm

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077061); 国网冀北电力有限公司科技项目资助“大规模新能源汇集区域分布调相机配置原则与协调控制方法研究”(52018K22001D)

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”目标的实施，新能源发电装机容量和装机占比持续增长，并逐渐成为电力系统中的主体电源^[1-4]。对于大规模新能源汇集的外送系统，当地区电网结构薄弱且缺乏支撑性电源时，新能源场站常由于短路比较低导致送出能力受限^[5-7]。电压跌落故障容易引起新能源机组的低电压脱网，故障恢复后又由于系统的无功过剩导致新能源机组高电压脱网，使得故障区域进一步扩大^[8-9]。

调相机具有较强的动态无功支撑能力^[10-11]，将其安装在新能源电源侧可有力支撑新能源大规模外送^[12-13]。《国家电网有限公司构建以新能源为主体的新型电力系统行动方案(2021-2030)》指出，需在新能源场站部署分布式调相机，提高新能源场站对电网的电压支撑能力。

相比于传统调相机，现代新型调相机通过对电机参数或励磁参数的优化设计，可全面改善其动态无功性能。文献[14]分析了调相机的动态无功特性，指出影响调相机无功特性的关键参数，并给出了参数优化方法。文献[15]指出调相机的无功输出特性主要取决于 d 轴参数，减小 d 轴次暂态电抗、开路和短路时间常数以及主变电抗，并提高励磁系统强励倍数，可有效提升调相机的动态无功支撑能力。在此基础上，文献[16]提出采用无功电流增益指标来衡量调相机的动态无功性能，通过分析无功电流增益指标的频域灵敏度，确定了影响调相机动态特性的主导参数及其优化方向。文献[17]针对分布式调相机，提出电磁参数的自适应寻优方法。文献[18]中分析表明，增大励磁电阻、减小励磁电抗可减小调相机的动态响应时间。文献[19]分析了不同励磁电阻和阻尼电阻对调相机的影响，研究结果表明励磁电阻越大，调相机的动态响应时间越短。

上述文献在进行调相机无功特性分析时，采用调相机的实用模型，实用模型是在 Park 模型的基础上通过引入某些假设条件得到的，在一定假设条件下对 Park 模型近似，如 6 阶实用模型中忽略了时间常数较小的定子绕组暂态。在新能源大规模送出背景下，新能源场站对电压扰动等动态较为敏感，而同步调相机的暂态无功特性对系统的电压稳定具有重要影响。为此本文提出了基于 Park 模型的同步调相机无功特性分析方法。

同时，现有研究在提升调相机动态无功性能时多侧重于对电磁(以及升压变，下同)参数的优化，但提高了电机的制造难度及成本。励磁系统作为影响调相机无功特性的重要部分，优化励磁参数可在

原有技术水平、成本的前提下提升调相机的无功响应能力。文献[20]研究表明，励磁参数优化可以提高调相机的动态无功输出，降低系统电压波动幅值，有助于风电机组实现高压或低压穿越。

但上述研究在参数优化时未考虑系统的稳定约束，未讨论参数区间的确定方法，可能导致不合理的参数优化结果；同时，仅依靠电磁参数的优化可能给生产企业带来较高的工艺要求和成本压力。如果能够通过优化励磁系统参数达到与改变电磁参数相同的无功特性，将极大地降低同步调相机的成本，有利于其工程应用的推广。

为此，本文提出考虑稳定约束的调相机励磁系统及升压变参数联合优化方法，旨在替代调相机的电磁参数优化方法。首先基于 Park 模型推导了调相机的无功电流响应特性，分析了其与实用模型相比精度的提升效果。然后根据调相机并网系统的稳定边界确定待优化参数的区间，采用人工鱼群算法对调相机励磁参数和变压器电抗进行联合优化。最后通过仿真验证了本文联合优化结果具备对电磁参数优化的替代性。

1 同步调相机的数学模型及动态无功特性

同步调相机是没有原动机的同步发电机，其数学模型与同步发电机一致，同步调相机的 Park 模型^[21-22]具体如下。

1.1 同步调相机 Park 模型

定子参考方向采用发电机惯例，以电流流出为正。 dq 坐标系下同步调相机的电压方程和磁链方程分别如式(1)、式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_f \\ u_D \\ u_Q \end{bmatrix} = p \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega\psi_q \\ \omega\psi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -ri_d \\ -ri_q \\ r_f i_f \\ r_D i_D \\ r_Q i_Q \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： u 和 i 分别表示电压和电流； ψ 表示磁链； r 表示定子电阻；下标 d 和 q 分别表示 d 轴和 q 轴分量； ω 为角频率； p 为微分算子；下标 f 表示励磁绕组；下标 D 和 Q 分别表示 d 轴和 q 轴阻尼绕组，且 $u_D = u_Q = 0$ 。

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d & 0 & x_{ad} & x_{ad} & 0 \\ 0 & x_q & 0 & 0 & x_{aq} \\ x_{ad} & 0 & x_f & x_{ad} & 0 \\ x_{ad} & 0 & x_{ad} & x_D & 0 \\ 0 & x_{aq} & 0 & 0 & x_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: x_d 和 x_q 分别为调相机的 d 轴和 q 轴同步电抗; x_{ad} 和 x_{aq} 分别为 d 轴和 q 轴互感抗; x_f 为励磁绕组的电抗; x_D 和 x_Q 分别为 d 轴和 q 轴阻尼绕组的电抗。

1.2 同步调相机励磁系统模型

同步调相机常采用并联 PID 控制的自并励励磁系统^[20], 见图 1。

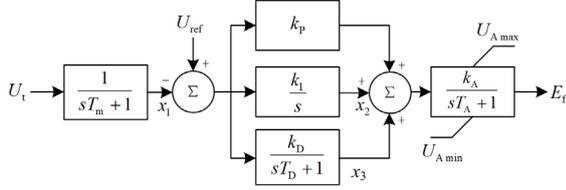


图 1 励磁系统模型框图

Fig. 1 Block diagram of excitation system

图 1 中: k_p 、 k_i 和 k_D 分别为励磁控制器比例、积分和微分环节增益系数; T_D 为励磁控制器微分环节的时间常数; k_A 和 T_A 分别为励磁调节器的增益系数和时间常数; T_m 为电压测量环节的时间常数; U_t 和 U_{ref} 分别为调相机的端口电压和参考电压; x_1 — x_3 为中间变量; U_{Amax} 和 U_{Amin} 分别为励磁放大环节电压最大值和最小值; E_f 为励磁电动势; s 为拉普拉斯算子。

图 1 的励磁系统数学模型表示为

$$\begin{cases} T_m p x_1 = U_t - x_1 \\ p x_2 = k_1 (U_{ref} - x_1) \\ T_D p x_3 = k_D (U_{ref} - x_1) - x_3 \\ T_A p E_f = k_A k_p (U_{ref} - x_1) + k_A x_2 + k_A x_3 - E_f \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3)可得励磁系统的传递函数为

$$F(s) = -\frac{\Delta E_f(s)}{\Delta U_t(s)} = -\frac{k_A \left(k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_D}{sT_D + 1} \right)}{(sT_m + 1)(sT_A + 1)} \quad (4)$$

式中, $\Delta E_f(s)$ 和 $\Delta U_t(s)$ 分别为频域下励磁电动势增量和调相机端口电压增量。

1.3 同步调相机的动态无功特性

以图 2 所示的同步调相机(synchronous condenser, SC)经电抗为 x_k 的升压变压器接入电力系统为例, 系统参数见表 1。调相机无功功率 Q_{SC} 为

$$Q_{SC} = u_q i_d - u_d i_q \quad (5)$$

调相机与电网之间的有功功率交换为零, 因此功角 $\delta = 0^\circ$, 则有 $u_d = U_t \sin \delta \approx 0$, $u_q = U_t \cos \delta \approx U_t$, 调相机无功功率变化量 ΔQ_{SC} 为

$$\Delta Q_{SC} = Q_{SC} - Q_{SC,0} = U_{t,0} \Delta i_d + \Delta U_t i_{d,0} \quad (6)$$

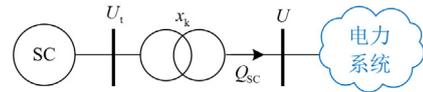


图 2 调相机并网系统

Fig. 2 Power system with SC integration

表 1 典型调相机电磁、励磁系统参数

Table 1 Parameters of typical SC electromagnetic and excitation system

模型	参数	数值	参数	数值
电磁模型	$x_d/\text{p.u.}$	1.49	$x'_d/\text{p.u.}$	0.14
	$x''_d/\text{p.u.}$	0.11	T'_{d0}/s	8.00
	T''_{d0}/s	0.06	$x_q/\text{p.u.}$	1.47
	$x''_q/\text{p.u.}$	0.11	T''_{q0}/s	0.06
	$x_k/\text{p.u.}$	0.13	—	—
	励磁系统	$k_A/\text{p.u.}$	50	$k_p/\text{p.u.}$
$k_i/\text{p.u.}$		0.5	$k_D/\text{p.u.}$	0.001
T_D/s		0.1	T_m/ms	20
T_A/ms		10	—	—
—		—	—	—

式中: $Q_{SC,0}$ 、 $U_{t,0}$ 和 $i_{d,0}$ 分别为调相机稳态运行时无功输出值、端口电压和 d 轴电流; Δi_d 为调相机 d 轴电流增量。由式(6)可知, 由于 ΔU_t 较小, 调相机无功变化量主要通过 Δi_d 描述, 因此调相机动态无功特性主要取决于 Δi_d 的响应。

假设 $\omega = 1$, 根据图 2 有 $U_t = x_k i_d + U$, 励磁电动势定义为 $E_f = x_{ad} u_f / r_f$ 。综合式(1)和式(2)的发电机模型及式(4)的励磁系统模型, 可得调相机的 d 轴电流增量表达式, 如式(7)所示, 具体推导见附录 A。

$$\Delta I_d(s) = -\frac{F(s) + f_{U,2}(s)}{f_{id,2}(s) + F(s)x_k} \Delta U(s) \quad (7)$$

式中: $\Delta I_d(s)$ 和 $\Delta U(s)$ 分别为频域下调相机的 d 轴电流增量和升压变高压侧电压增量; $f_{U,2}(s)$ 和 $f_{id,2}(s)$ 分别为 E_f 关于 I_d 和 U 的传递函数, 详见附录 A。

6 阶实用模型下调相机的 d 轴电流^[15]表示为

$$\Delta I_d(s) = \frac{1}{x''_{d\Sigma}} \left(\frac{as + b - F(s)x''_d}{As^2 + Bs + C + F(s)x_k} - 1 \right) \Delta U(s) \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} A = T'_{d0} T''_{d0} (x''_d + x_k) \\ B = \frac{x_d - x''_d}{x'_d - x''_d} (x''_d + x_k) T''_{d0} + (x'_d + x_k) T'_{d0} \\ C = x_d + x_k \\ a = (x'_d - x''_d) T'_{d0} \\ b = x_d - x''_d \\ x''_{d\Sigma} = x''_d + x_k \end{cases} \quad (9)$$

式中: x'_d 和 x'_q 分别为 d 轴和 q 轴的暂态电抗; x''_d 和 x''_q 分别为 d 轴和 q 轴的次暂态电抗; T'_{d0} 和 T'_{q0} 分别为 d 轴和 q 轴的暂态开路时间常数; T''_{d0} 和 T''_{q0} 分别为 d 轴和 q 轴的次暂态开路时间常数。

2 同步调相机动态无功特性评价指标

采用文献[16]所示的无功电流增益 K_{iQ} 评价调相机的动态无功特性, 具体为

$$K_{iQ} = \Delta I_d \frac{-\Delta U}{|\Delta U|^2} \quad (10)$$

定义 $G(s) = -\Delta I_d(s)/\Delta U(s)$, 令 $s = j\omega$, 则有

$$K_{iQ} = |G(j\omega)| \cos(\theta_\omega) = \text{Re}[G(j\omega)] \quad (11)$$

式中: ω 为频率; θ_ω 为 $G(j\omega)$ 相角。

以图 2 所示调相机并网系统为例, 基于 Park 模型和 6 阶实用模型的无功电流增益 K_{iQ} 的频域特性见图 3。可以看出: (1) 在 50 Hz 以下频段, 基于 Park 模型和 6 阶实用模型的 K_{iQ} 基本重合, 但在 50 Hz 以上频段有差别; (2) 基于 Park 模型的 K_{iQ} 在 74 Hz 附近幅值变化较大, 但 6 阶实用模型的 K_{iQ} 基本不变; (3) 在 100 Hz 以上频段内, Park 模型的 K_{iQ} 接近于 0, 但 6 阶实用模型的 K_{iQ} 却大于 0。

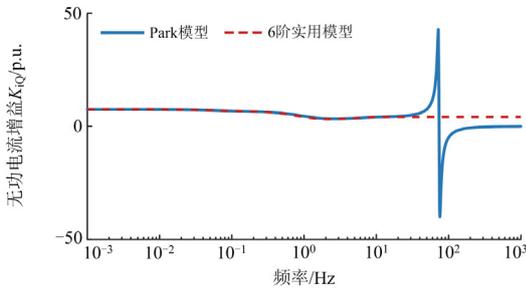


图 3 基于 Park 模型和 6 阶实用模型的 K_{iQ}

Fig. 3 K_{iQ} based on Park model and 6th-order practical model

为分析两种模型下 K_{iQ} 响应特性不同的原因, 将式(11)表示为式(12)和式(13)的形式。

$$K_{iQ,p} = \text{Re} \left(\frac{d'_{p7}\omega^7 + d'_{p6}\omega^6 + \dots + d'_{p0}}{d_{p9}\omega^9 + d_{p8}\omega^8 + \dots + d_{p0}} \right) \quad (12)$$

$$K_{iQ,s} = \text{Re} \left(\frac{d'_{s6}\omega^6 + d'_{s5}\omega^5 + \dots + d'_{s0}}{d_{s6}\omega^6 + d_{s5}\omega^5 + \dots + d_{s0}} \right) \quad (13)$$

式中: $K_{iQ,p}$ 和 $K_{iQ,s}$ 分别为 Park 模型和 6 阶实用模型下的无功电流增益; $d_{p0} - d_{p9}$ 、 $d'_{p0} - d'_{p7}$ 、 $d_{s0} - d_{s6}$ 和 $d'_{s0} - d'_{s6}$ 分别为两种模型下传递函数的系数。

从式(12)和式(13)可以看出:

1) $K_{iQ,p}$ 为 9 阶, 而 $K_{iQ,s}$ 为 6 阶。这是由于 Park 模型下 dq 轴存在耦合; 而实用模型下 dq 轴解耦, 此时 d 轴电流仅与直轴瞬态电势 E'_q 和直轴超瞬态电势 E''_q 相关。

2) 在 100 Hz 以上的高频段, $K_{iQ,p}$ 和 $K_{iQ,s}$ 差异较大, 其原因在于: $K_{iQ,p}$ 的分子阶数低于分母的阶数, 高阻作用使得 $K_{iQ,p}$ 接近于 0; 而 $K_{iQ,s}$ 分子与分母的阶数一致, 其幅值取决于分子分母最高次项的系数。

由式(12)和式(13)可得传递函数极点, 见表 2。

表 2 两种模型下调相机传递函数极点

Table 2 Transfer function pole values of SC by two models

模型	极点					
	$\lambda_{1,2}$	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
Park 模型	$-11.6 \pm j2\pi 74.0$	-254	-102	-50	-21	-6.51
6 阶实用模型	λ_8	λ_9	—	—	—	—
	-9.97	-0.31	—	—	—	—
6 阶实用模型	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9
	-102	-50	-21	-6.68	-9.95	-0.31

从表 2 可以看出, $K_{iQ,p}$ 存在共轭复数极点对 $\lambda_{1,2}$, 对应频率为 74 Hz。由于共轭复数极点附近 $K_{iQ,p}$ 分母接近于零, 因此在 74 Hz 附近 $K_{iQ,p}$ 幅值较大。

因此, 采用 Park 模型更能准确地表达同步调相机的动态无功特性。同时由于 $K_{iQ,p}$ 在 100 Hz 以上的高频段接近于 0, 因此参数优化时应重点考虑 100 Hz 以下频段内同步调相机的动态无功特性。

3 待优化重点参数及参数区间的确定

K_{iQ} 表征了调相机的动态无功性能, 特定频率下 K_{iQ} 数值越大说明动态无功特性越优。为提升同步调相机的动态无功性能, 现有方法常要求次暂态直轴电抗 x''_d 和升压变电抗 x_k 数值较小。然而对生产厂家来说, 大幅减小电机电抗 x''_d 所需的较高的制造工艺成本。通常励磁系统参数更容易设置和调节, 如果能够通过优化励磁系统参数达到与改变电机参数相同的无功性能, 将较大程度地降低调相机的成本, 有利于其工程应用的推广。

对励磁系统参数进行优化前, 首先确定影响调相机无功动态的关键参数, 将其作为待优化参数; 其次, 给出各参数的搜索范围, 本文提出基于同步调相机并网系统的稳定边界, 确定各参数的搜索上限。

3.1 基于频域灵敏度确定待优化重点参数

某参数对 K_{iQ} 的灵敏度越高, 说明其对调相机的动态无功特性影响越大, 该参数即为主导参数。定义如式(14)^[16]所示。

$$S = \frac{\partial K_{iQ}}{\partial \theta} \quad (14)$$

式中: θ 表示某参数; S 表示参数频域灵敏度, 其幅值表征了参数 θ 对 K_{iQ} 的影响程度, S 越大则影响越大。

各参数相对 Park 模型下无功电流增益 $K_{iQ,p}$ 的频域灵敏度如图 4 所示。由图 4 可以看出:

1) 各参数在 74 Hz 附近灵敏度幅值较大, 这是由于 $K_{iQ,p}$ 在 74 Hz 附近存在共轭复数极点。

2) 在 100 Hz 以上频段内, 各参数的灵敏度接近于 0。因此, 在 74 Hz 及以上频段内进行参数优化作用不大。

3) 在 50 Hz 以下频段内, 电磁参数中 d 轴的 x'_d 、 x''_d 、 T''_{d0} 以及升压变电抗 x_k 的灵敏度最大, x_d 的灵敏度次之, 其余参数的灵敏度较小。同时参数 x'_d 和 T''_{d0} 的灵敏度数值有正有负, 说明参数 x'_d 和 T''_{d0} 在不同频段内对调相机无功特性的影响不同。总体来说, 通过减小直轴暂态电抗 x'_d 、次暂态电抗 x''_d 、次暂态开路时间常数 T''_{d0} 和升压变电抗 x_k 可提升调相机在该频段的无功性能。

4) 在 50 Hz 以下频段内, 励磁参数中励磁调节器的增益系数 k_A 、 k_p 和 k_i 的灵敏度最大, 测量环节以及放大环节的时间常数 T_m 和 T_A 的灵敏度次之, 其余参数的灵敏度较小。虽然上述灵敏度数值均出现了正负, 但总体来说, 增大增益系数、减小时间常数可提高同步调相机的动态无功性能。

因此, 影响调相机无功特性的重点参数分别为

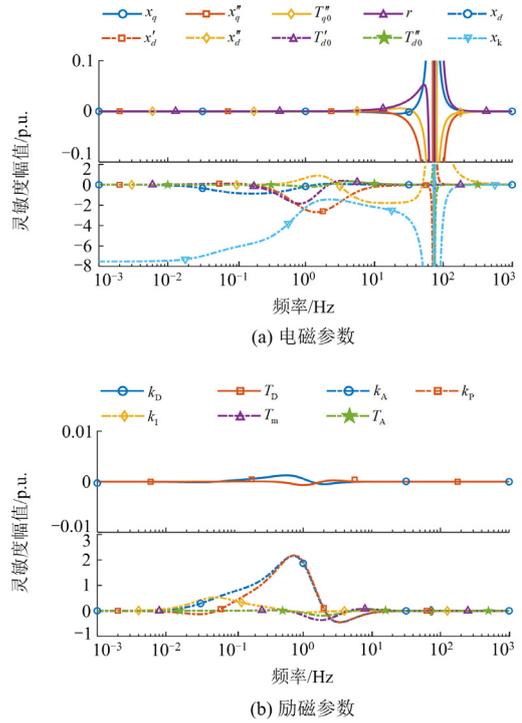


图 4 Park 模型下参数的频域灵敏度

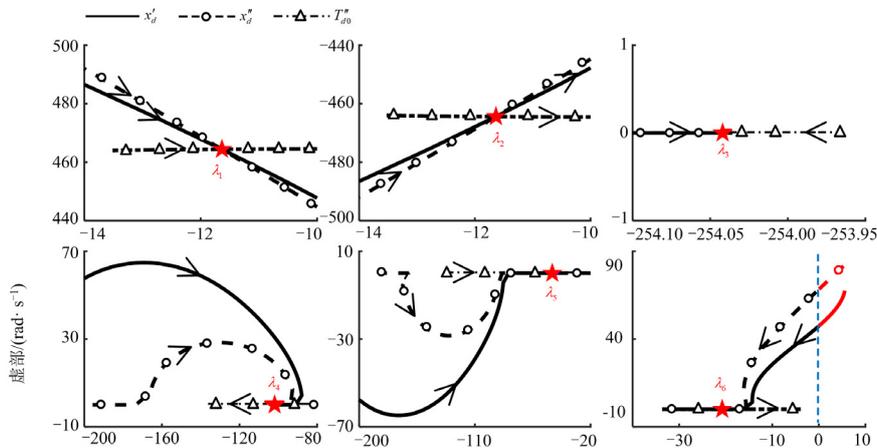
Fig. 4 Parameter frequency domain sensitivity with Park model

调相机电磁参数 $\{x'_d, x''_d, T''_{d0}\}$ 、励磁系统参数 $\{k_A, k_p, k_i, T_m, T_A\}$ 和升压变电抗 x_k 。

3.2 基于系统稳定边界确定参数区间

为优化同步调相机的无功特性, 需要先给出各参数的搜索范围。为此本文提出基于同步调相机并网系统的稳定边界, 确定各主导参数的搜索上限。

式(12)的极点即对应系统的特征根, 调整某参数 θ 直至极点实部过 0 (小扰动稳定边界), 见图 5。图中: 箭头表示参数增大时极点的变化方向; 红星表示初始参数下系统特征值; 红色线段表示极点实部大于 0 的部分。



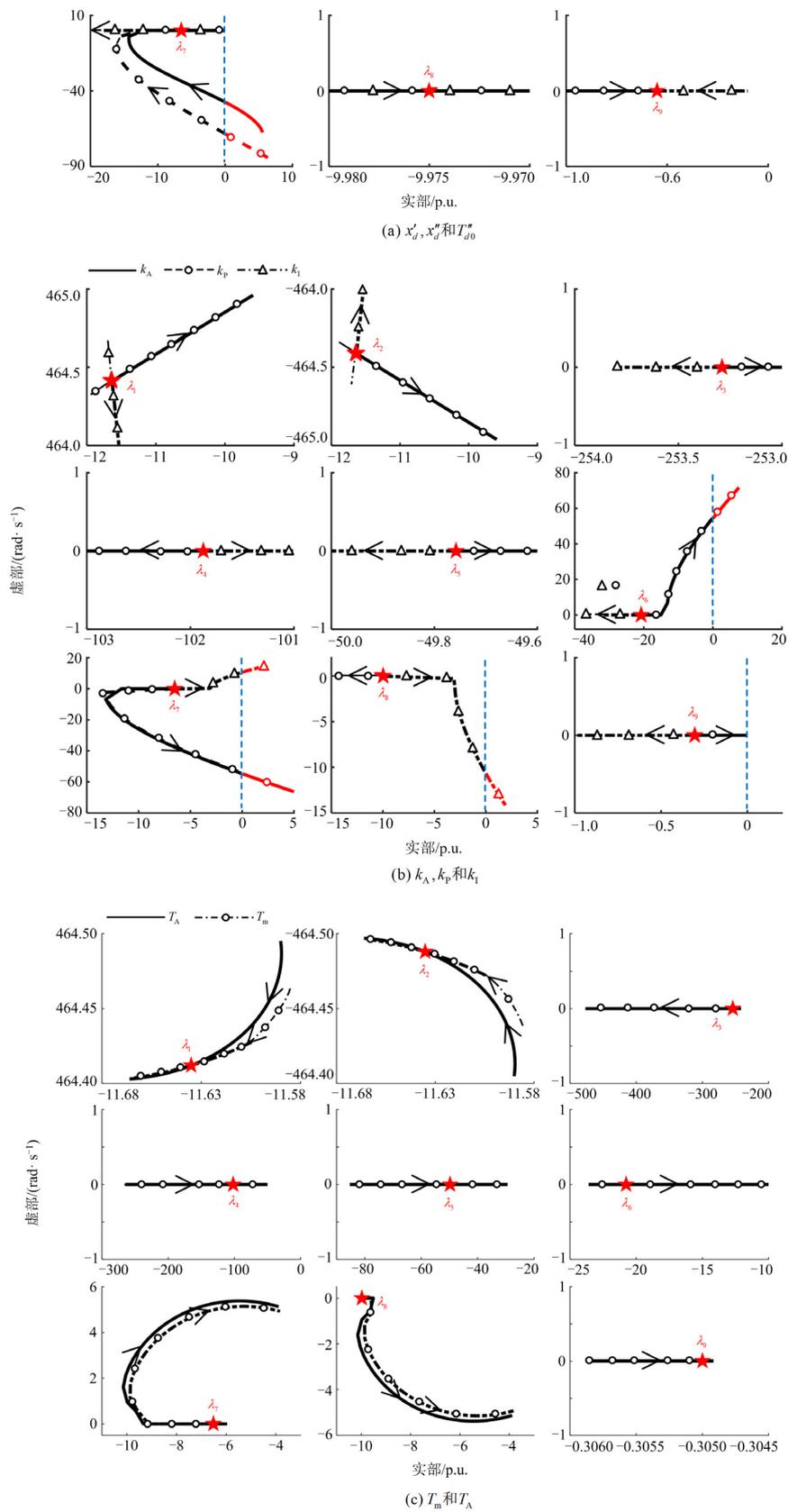


图 5 各极点随参数的变化趋势

Fig. 5 Poles eigenvalue trend with parameter changes

由图 5 可见:

1) 电磁参数 x'_d 、 x''_d 和 T''_{d0} 对极点影响趋势不同。 x'_d 和 x''_d 的增大将导致其极点 $\lambda_1 - \lambda_5$ 、 λ_8 、 λ_9 的实部向正半轴移动, 极点 λ_6 和 λ_7 向负半轴移动。 T''_{d0} 增大则使极点 λ_3 、 λ_4 、 λ_7 、 λ_9 实部向负半轴移动, 其余极点向正半轴移动。较小的电磁参数 x'_d 和 x''_d 将会使极点 λ_6 和 λ_7 实部大于 0, 系统失稳。

2) 增益系数 k_A 和 k_p 对极点影响基本一致。随着 k_A 和 k_p 的增加, 极点 λ_6 和 λ_7 率先越过系统稳定边界, 而增大 k_i 则将导致 λ_7 和 λ_8 的极点实部大于 0。

3) 随着 T_m 和 T_A 的增加, 极点 $\lambda_1 - \lambda_3$ 的实部向负半轴移动, 其余极点实部向正半轴移动。

将传递函数的极点在实部为 0 处作为系统的稳定边界, 该稳定边界对应的数值即为该参数的下限或上限。进一步根据工程实际对各参数区间进行修正, 见表 3。

表 3 考虑系统稳定边界的参数上限

参数	稳定边界	工程实际修正
$x'_d/\text{p.u.}$	$(0.0067, +\infty)$	$[0.12, 0.15]$
$x''_d/\text{p.u.}$	$(0.0046, +\infty)$	$[0.09, 0.12]$
T''_{d0}/s	$(0.001, +\infty)$	$[0.05, 0.07]$
$x_k/\text{p.u.}$	$(0.01, +\infty)$	$[0.09, 0.14]$
$k_A/\text{p.u.}$	$(0, 1520)$	$(0, 100)$
$k_p/\text{p.u.}$	$(0, 46.3)$	$(0, 46.3)$
$k_i/\text{p.u.}$	$(0, 38.5)$	$(0, 38.5)$
T_A/ms	$(0, 100]$	$[5, 20]$
T_m/ms	$(0, 100]$	$[5, 20]$

3.3 基于 ASF 的参数优化算法

一般通过优化调相机的电磁或励磁参数提升调相机的动态无功性能。优化的目标函数为

$$\begin{aligned} \max \bar{K}_{iQ,p} &\in [0.001, 100] \\ \text{s.t. } \theta_{i,\min} &\leq \theta_i \leq \theta_{i,\max}, i=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $\bar{K}_{iQ,p}$ 表示无功电流增益在 0.001~100 Hz 频段的均值; $\theta_{i,\min}$ 和 $\theta_{i,\max}$ 分别表示待优化参数 θ_i 的下限和上限; 下标 i 表示第 i 个参数; n 表示待优化的参数个数。

人工鱼群(artificial fish swarm, AFS)算法是一种启发式寻优算法^[23], 它通过模仿鱼群在觅食过程中的行为实现全局寻优。AFS 具有参数设置少、对初值不敏感等优点, 为此本文采用 AFS 算法进行调相机的参数优化。

3.4 电磁参数提升调相机无功性能的可替代性分析

根据图 4(a)可知, 调相机电磁参数对无功电流增益 $K_{iQ,p}$ 的灵敏度较高, 因此现有方法一般通过调整电磁参数(主要是 x''_d)提升调相机的动态无功性能。为此, 本文首先对电磁和升压变参数 $\{x'_d, x''_d, T''_{d0}, x_k\}$ 按照式(16)的目标函数进行优化, 优化结果分别见表 4 和图 6。

从图 6 可以看出, 中低频段 $K_{iQ,p}$ 值显著提高, 表明电磁参数优化有效提升了调相机的动态无功性能。但从表 4 可以看出, 优化后调相机参数 x''_d 即为其下限值(0.09 p.u.)。对于调相机制造厂商来说, 较低的次暂态电抗将显著增加制造工艺的难度和成本。

表 4 参数优化结果

Table 4 Parameter optimization results

参数	初始值	参数优化区间	电磁与升压变优化	励磁与升压变优化
$x'_d/\text{p.u.}$	0.14	$[0.12, 0.15]$	0.12	—
$x''_d/\text{p.u.}$	0.11	$[0.09, 0.12]$	0.09	—
T''_{d0}/s	0.06	$[0.05, 0.07]$	0.05	—
$x_k/\text{p.u.}$	0.13	$[0.09, 0.14]$	0.09	0.10
$k_A/\text{p.u.}$	50	$(0, 100)$	—	65.8
$k_p/\text{p.u.}$	1.5	$(0, 46.3)$	—	20.2
$k_i/\text{p.u.}$	0.5	$(0, 38.5)$	—	38.5
T_m/ms	20	$[5, 20]$	—	9.0
T_A/ms	10	$[5, 20]$	—	5.3

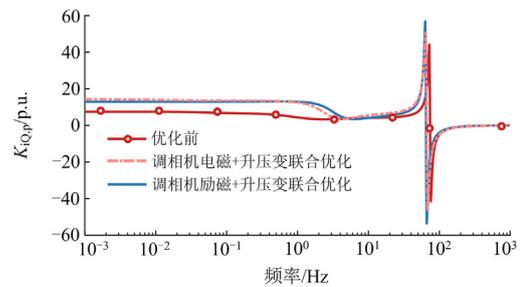


图 6 参数优化前后 $K_{iQ,p}$

Fig. 6 $K_{iQ,p}$ before and after parameter optimization

相较于调节调相机电磁参数来说, 励磁系统属于控制设备, 调节其参数值相对容易, 同时升压变电抗也可以参与调节。为此本文以电磁参数优化后的 $K_{iQ,p}$ 为基准, 采用励磁参数以及升压变电抗的联合优化, 分析其对电磁参数优化的可替代性。

采用表 4 中电磁参数和升压变参数的初始值和参数区间, 以仅采用电磁参数优化后的 $K_{iQ,p}$ (图 6 中的红色虚线)为目标, 将励磁与升压变参数进行联

合优化, 优化结果见表 4 和图 6。

从图 6 可以看出, 调相机电磁参数采用初始值、优化励磁和升压变参数获得的 $K_{iQ,p}$, 与励磁参数采用初始值、优化电磁与升压变参数获得的 $K_{iQ,p}$ 较接近, 说明采用励磁参数与升压变参数的协同优化替代电磁参数优化具备可行性。

4 算例分析

为验证调相机励磁与升压变参数联合优化对于调相机电磁与升压变参数优化的可替代性, 基于 Matlab/Simulink 平台建立图 7 所示的 4 机 2 区系统, 设有 3 台额定容量皆为 30 MVA 的分布式调相机经 10 kV/230 kV 升压变接入 9 号节点。

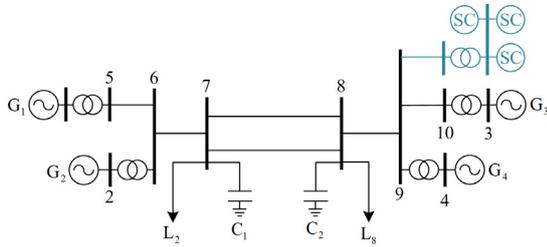


图 7 含同步调相机的 4 机 2 区域系统

Fig. 7 The 4-machine 2-area system with SC integration

扰动 1 设置为 $t = 6\text{ s}$ 时输电线路 7-8 中一回线的中点发生三相短路故障, 故障持续 0.1 s 后切除, 系统恢复至原状态。图 8 为参数优化前后单单调相机无功受扰轨迹。

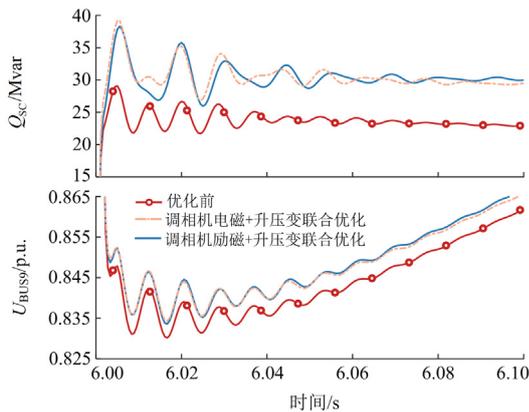


图 8 电压跌落扰动下调相机的受扰轨迹

Fig. 8 Disturbed trajectories of SC under voltage dip

扰动 2 设置为 $t = 6\text{ s}$ 时负荷节点 8 的无功功率突增 200 Mvar, 导致节点 9 的电压抬升。图 9 为电压抬升扰动下调相机的无功受扰轨迹。

从图 8 和图 9 可以看出: 1) 扰动开始瞬间, 同步调相机能够随电压降低/抬升迅速增加/减小无功

出力, 具有较好的动态无功支撑能力; 2) 通过优化电磁参数或者联合优化励磁与升压变参数, 调相机均可表现出更优越的动态无功特性和电压支撑能力, 相较于优化前调相机在扰动期间无功出力显著增加/降低, 电压跌落/抬升明显减小; 3) 根据两种优化结果下调相机的受扰轨迹, 可以看出调相机励磁与升压变参数联合优化的替代效果。经两种方法优化后的调相机, 在电压跌落与电压抬升场景下拥有相近的无功响应能力, 无功响应速度、无功输出基本一致。具体为: 1) 扰动 1 电压跌落发生后的 100 ms 期间, 电磁参数优化下调相机平均无功输出为 30.2 Mvar, 联合优化的调相机平均无功输出为 30.0 Mvar, 无功输出仅相差 0.7%; 2) 扰动 2 电压抬升发生后的 100 ms 内, 电磁参数优化后的调相机平均无功输出为 6.7 Mvar, 联合参数优化的调相机平均无功输出为 6.6 Mvar, 二者无功性能基本一致, 无功输出仅相差 1.5%。

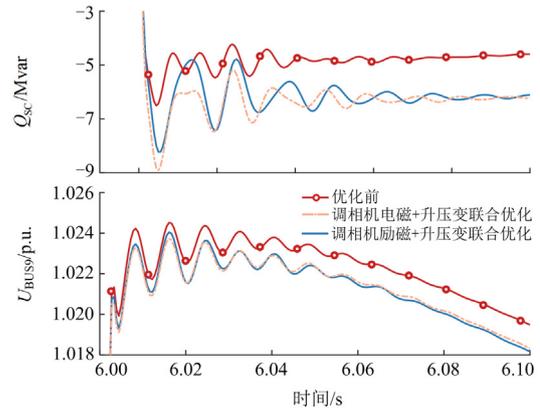


图 9 电压抬升扰动下调相机的受扰轨迹

Fig. 9 Disturbed trajectories of SC under voltage jump

综上, 调相机励磁系统和变压器电抗的联合优化在无功电流增益指标和动态响应中均表现出与电磁参数优化相近的无功性能, 因此, 可通过对励磁系统和变压器参数的联合优化替代电磁参数的优化, 从而降低对调相机电磁参数的下限要求, 提升调相机的工程应用能力。

5 结语

本文基于 Park 模型分析同步调相机的动态无功特性, 相较于现有实用模型具有更高的准确性。首先推导了 Park 模型下同步调相机的无功电流增益 K_{iQ} 的表达式, 并将其与现有基于 6 阶实用模型下的 K_{iQ} 进行对比, 可以发现: 在 50 Hz 以下的低频段两种模型的无功响应特性基本一致, 在 50 Hz 以上频段内二者相差较大, 说明采用 Park 模型分析同步调相机的动态无功特性的必要性。

为提升同步调相机的动态无功性能, 现有方法常要求其电磁参数尤其是次暂态直轴电抗 x_d'' 的数值较小。然而对生产厂商来说, 大幅减小电机参数 x_d'' 需要较高的制造工艺和成本; 而调节励磁和升压变参数相对容易实现, 为此本文提出调相机电磁参数优化的替代性方法。以仅优化调相机电磁参数下的动态无功特性为参考, 提出调相机励磁和升压变联合优化方法。结果表明, 励磁和升压变参数的联合优化, 可实现与电磁参数单独优化相近的调相机无功响应能力。因此, 可通过对励磁系统和变压器参数的联合优化替代电磁参数的优化, 从而降低对调相机电磁参数的下限要求以及调相机的制造成本, 有利于调相机在工程中的应用。

附录 A

忽略机械暂态过程, 认为 $\omega=1$, 则联立式(1)、式(2)进行拉氏变换, 可得

$$U_d = s(-x_d I_d + x_{ad} I_f + x_{ad} I_D) - (-x_q I_q + x_{aq} I_Q) - r I_d \quad (A1)$$

$$U_q = s(-x_q I_q + x_{aq} I_Q) + (-x_d I_d + x_{ad} I_f + x_{ad} I_D) - r I_q \quad (A2)$$

$$U_f = s(-x_{ad} I_d + x_f I_f + x_{ad} I_D) + r_f I_f \quad (A3)$$

$$0 = s(-x_{ad} I_d + x_{ad} I_f + x_D I_D) + r_D I_D \quad (A4)$$

$$0 = s(-x_{aq} I_q + x_Q I_Q) + r_Q I_Q \quad (A5)$$

由式(A4)、式(A5)可得

$$I_D = \frac{s \cdot x_{ad}}{s \cdot x_D + r_D} (I_d - I_f) \quad (A6)$$

$$I_Q = \frac{s \cdot x_{aq}}{s \cdot x_Q + r_Q} I_q \quad (A7)$$

对于调相机, $U_d = U_t \sin \delta \approx 0$, $U_q = U_t \cos \delta \approx U_t$, $U_t = x_k I_d + U$, 将式(A6)、式(A7)代入式(A1)、式(A2)中得到 I_q 、 I_f 关于 I_d 、 U 的表达式。

$$I_q = \frac{(s \cdot x_Q + r_Q)[(r - s \cdot x_k)I_d - s \cdot U]}{(s^2 + 1) \cdot M(s) + N(s)} \quad (A8)$$

$$I_f = f_{id,1}(s) \cdot I_d + f_{u,1}(s) \cdot U \quad (A9)$$

其中

$$M(s) = -s \cdot x_{aq}^2 + r_Q x_q + s \cdot x_q x_Q$$

$$N(s) = s \cdot r(r_Q + s \cdot x_Q)$$

$$f_{id,1}(s) = \frac{-r + s \cdot \left(\frac{s \cdot x_{ad}^2}{s \cdot x_D + r_D} - x_d \right) + \frac{(r - s \cdot x_k) \cdot M(s)}{(s^2 + 1) \cdot M(s) + N(s)}}{s \cdot x_{ad} \left(\frac{s \cdot x_{ad}}{s \cdot x_D + r_D} - 1 \right)}$$

$$f_{u,1}(s) = \frac{-M(s) \cdot U}{x_{ad} \left(\frac{s \cdot x_{ad}}{s \cdot x_D + r_D} - 1 \right) [(s^2 + 1) \cdot M(s) + N(s)]}$$

定义励磁电动势 $E_f = (x_{ad} \cdot u_f) / r_f$, 因此联立式(A3)、式(A6)、式(A9)可得

$$E_f = f_{id,2}(s) \cdot I_d(s) + f_{u,2}(s) \cdot U \quad (A10)$$

其中

$$f_{id,2}(s) = x_{ad} \left\{ \frac{f_{id,1}(s) + \frac{s \cdot x_f \cdot f_{id,1}(s) - s \cdot x_{ad}}{r_f} + \frac{s^2 \cdot x_{ad}^2 [1 - f_{id,1}(s)]}{r_f (s \cdot x_D + r_D)}}{f_{u,1}(s) - \frac{s^2 \cdot x_{ad}^2 \cdot f_{u,1}(s)}{r_f (s \cdot x_D + r_D)} + \frac{s \cdot x_f \cdot f_{u,1}(s)}{r_f}} \right\}$$

将式(A10)表示为增量方程形式与式(4)联立, 得到 ΔI_d 与 ΔU 的传递函数为

$$\Delta I_d = -\frac{F(s) + f_{u,2}(s)}{f_{id,2}(s) + F(s) x_k} \Delta U \quad (A11)$$

参考文献

- [1] 齐金山, 姚良忠, 廖思阳, 等. 高比例新能源电力系统静态电压稳定裕度在线概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 47-57.
QI Jinshan, YAO Liangzhong, LIAO Siyang, et al. Online probabilistic assessment of static voltage stability margin for power systems with a high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 47-57.
- [2] LI Botong, ZHENG Dingchuan, LI Bin, et al. Analysis of low voltage ride-through capability and optimal control strategy of doubly-fed wind farms under symmetrical fault[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 585-599.
- [3] 王智伟, 张振宇, 李征, 等. 提升高渗透率新能源电网承载能力的 DCSS 优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 179-187.
WANG Zhiwei, ZHANG Zhenyu, LI Zheng, et al. Optimized DSSC configuration to enhance load-carrying capacity of the new energy grid with high permeability[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 179-187.
- [4] 王耀翔, 戴朝波, 杨志昌, 等. 考虑风电机组无功潜力的风电场无功电压控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 83-90.
WANG Yaoliang, DAI Chaobo, YANG Zhichang, et al. Voltage control strategy for a wind farm considering the reactive capability of DFIGs[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 83-90.
- [5] LUND T, WU H, SOLTANI H, et al. Operating wind power plants under weak grid conditions considering voltage stability constraints[J]. IEEE Transactions on Power

- Electronics, 2022, 37(12): 15482-15492.
- [6] 田新成, 李华, 晏坤, 等. 基于改进贝叶斯的新能源场站并网处系统谐波阻抗估计[J]. 供用电, 2023, 40(10): 35-45.
TIAN Xincheng, LI Hua, YAN Kun, et al. Estimation of utility harmonic impedance at grid-connected new energy field stations based on improved Bayesian methodology[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(10): 35-45.
- [7] LI C, HUANG Y, DENG H, et al. A novel grid-forming technology for transient stability enhancement of power system with high penetration of renewable energy[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2022, 143: 108402.
- [8] 杨振南, 陈锦昌, 李新超, 等. 基于 PCA-PNN-LVQ 的电压跌落扰动源辨识方法[J]. 供用电, 2023, 40(7): 48-56.
YANG Zhennan, CHEN Jinchang, LI Xinchao, et al. Identification method for voltage drop disturbance sources based on PCAPNN-LVQ[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(7): 48-56.
- [9] ALAM M R, MUTTAQI K M, BOUZERDOUM A. Characterization of voltage dips and swells in a DG-embedded distribution network during and subsequent to islanding process and grid reconnection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 4028-4038.
- [10] 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): 6050-6064.
GUA Qiang, LI Zhiqiang. Summarization of synchronous condenser development[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 6050-6064.
- [11] 王继豪, 王安东, 孙福春, 等. 基于交替迭代优化的同步调相机电气参数分步辨识方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 99-105.
WANG Jihao, WANG Andong, SUN Fuchun, et al. A step-by-step identification method of synchronous condenser electrical parameters based on alternative iterative optimization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 99-105.
- [12] HADAVI S, MANSOUR M Z, BAHRANI B. Optimal allocation and sizing of synchronous condensers in weak grids with increased penetration of wind and solar farms[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2021, 11(1): 199-209.
- [13] MARKEN P E, DEPOIAN A C, SKLIUTAS J, et al. Modern synchronous condenser performance considerations[C] // IEEE PES General Meeting, Detroit, July 24-29, 2011, MI, USA: 1-5.
- [14] 程明, 田伟杰, 王伟, 等. 新型同步调相机的关键技术及研究进展[J]. 电力工程技术, 2020, 39(2): 2-9.
CHENG Ming, TIAN Weijie, WANG Wei, et al. Review on key technologies and latest development of new synchronous condenser[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2): 2-9.
- [15] 李志强, 蒋维勇, 王彦滨, 等. 大容量新型调相机关键技术参数及其优化设计[J]. 大电机技术, 2017(4): 15-22.
LI Zhiqiang, JIANG Weiyong, WANG Yanbin, et al. Key technical parameters and optimal design of new types of large capacity synchronous condenser[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2017(4): 15-22.
- [16] 李志强, 种芝艺, 黄金军. 快速动态响应同步调相机动态无功特性试验验证[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6877-6885, 7101.
LI Zhiqiang, CHONG Zhiyi, HUANG Jinjun. Test verification of dynamic reactive power characteristics of fast dynamic response synchronous condenser[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6877-6885, 7101.
- [17] 孙双魁, 施俊俊, 张存朝, 等. 新型分布式调相机动态性能参数自适应优化[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(4): 91-98.
SUN Shuangkui, SHI Junjun, ZHANG Cunhao, et al. Adaptive optimization of dynamic performance parameters of the new-type distributed condenser[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(4): 91-98.
- [18] MA Yiming, ZHOU Libing, WANG Jin, et al. Analysis for influence of novel synchronous condenser access on dynamic process of UHVDC transmission lines[C] // Global Energy Interconnection and University Innovation and Development Forum, September 26, 2018, Jinan, China.
- [19] 许国瑞, 厉璇, 蒲莹, 等. 同步调相机励磁及阻尼电阻对动态运行特性的影响[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2018, 45(6): 52-58, 67.
XU Guorui, LI Xuan, PU Ying, et al. Influence of resistance of excitation winding and damping winding on dynamic operating characteristic of synchronous condenser[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2018, 45(6): 52-58, 67.
- [20] 付敏, 崔灿灿, 王璐瑶, 等. 分布式调相机励磁系统参数优化模型研究[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(2): 102-110.
FU Min, CUI Cancan, WANG Luyao, et al. Parameters optimization model study of excitation system of distributed synchronous condenser[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(2): 102-110.
- [21] 倪以信. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [22] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Companies Inc., 1994.
- [23] 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2002(11): 32-38.
LI Xiaolei, SHAO Zhijiang, QIAN Jixin. An optimizing method based on autonomous animals: fish-swarm algorithm[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2002(11): 32-38.

收稿日期: 2023-11-19; 修回日期: 2023-12-22

作者简介:

潘学萍(1972—), 女, 博士, 教授, 研究方向为新能源电力系统建模与分析; E-mail: xueping_pan@163.com

许一(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为同步调相机参数优化及其控制; E-mail: xu-yi@hhu.edu.cn

郭金鹏(1992—), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 研究方向为新型电力系统稳定性分析和控制。E-mail: jinpeng.guo@hhu.edu.cn

(编辑 许威)