

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240264

应对直流闭锁故障的调相机励磁控制参数优化策略

苑田润, 李凤婷, 尹纯亚

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 针对直流闭锁故障引起的暂态过电压问题, 提出了一种调相机励磁系统控制参数优化策略。首先, 引入暂态电压影响因子量化分析了直流闭锁故障下调相机无功出力对暂态电压的影响。基于调相机的暂态特性分析, 明确了励磁系统控制参数对调相机暂态无功出力的影响机理。其次, 推导建立了直流闭锁故障下调相机动态无功出力与暂态过电压的量化关系, 并量化分析了调相机暂态无功出力与励磁控制参数之间的关系。提出了一种抑制过电压的励磁系统控制参数优化策略, 可实现直流闭锁故障下调相机暂态无功调节能力的深度挖掘。最后, 在 PSCAD 仿真平台中搭建含调相机的交直流混联系统, 仿真验证了所提出的励磁参数优化策略具有较好的暂态过电压抑制能力。

关键词: 调相机; 暂态过电压; 直流闭锁; 励磁系统

Optimization strategy of condenser excitation control parameters under DC blocking faults

YUAN Tianrun, LI Fengting, YIN Chunya

(College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: To address a transient overvoltage problem caused by DC blocking faults, an optimization strategy of the excitation system control parameters of the condenser is proposed. First, a transient voltage influence factor is introduced to quantitatively analyze the influence of the reactive power output of the condenser on the transient voltage under a DC blocking fault, and based on the transient characteristic analysis of the condenser, the influence mechanism of the excitation system control parameters on the transient reactive power output of the condenser is clarified. Secondly, the quantitative relationship between the dynamic reactive power output and transient overvoltage of the condenser under a DC blocking fault is established, and the relationship between the transient reactive power output of the condenser and the excitation control parameters is quantitatively analyzed. An optimization strategy of the excitation system control parameters for suppressing the overvoltage is put forward. This can realize deep mining of the condenser's transient reactive power regulating capability under a DC blocking fault. Finally, an AC-DC hybrid system with a condenser is constructed on the PSCAD simulation platform. The simulation verifies that the proposed excitation parameter optimization strategy has good transient overvoltage suppression capability.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 5236070148).

Key words: condenser; transient overvoltage; DC blocking; excitation system

0 引言

高压直流输电 (high voltage direct current, HVDC) 因其输电距离远、输送容量大、输电损耗小等优点已被广泛运用于远距离输电及非同步联网领域^[1-3]。但随着新能源装机容量在我国电力系统中的占比不断增加, 我国对于高压直流输电系统的应用

规模也在不断扩大, 导致弱送端系统的暂态稳定性进一步降低^[4], 从而使电力系统故障的程度不断加剧, 故障发生时其系统所面临的冲击范围也在不断扩大。且由于新能源机组对于系统无功支撑能力较弱, 直流闭锁故障发生后, 送端交流系统产生的大量无功盈余将倒送到交流系统引起严重的暂态过电压^[5-6], 严重威胁电力系统的安全稳定运行。

目前对于直流闭锁故障下的送端暂态过电压的问题已展开了诸多研究, 在暂态过电压引起的新能

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (5236070148)

源电压穿越方面,文献[7]研究了风电直流送出系统送端暂态过电压的问题,分析了 PMSG 控制策略对故障状态下并网点暂态过电压的影响。文献[8]结合准稳态计算公式分析了直流送端交流母线电压变化对双馈风机的影响,并提出了一种改进低-高电压故障穿越及过电压主动抑制策略。文献[9-11]则从风机控制特性与风机机端暂态过电压相互关系出发,通过机电暂态仿真分析了风机控制参数对故障期间机端暂态过电压的影响。上述文献围绕风机自身特性加以分析并对其自身参数及控制策略进行改造,费时费力,且随着新能源比例的进一步提升,现有研究无法有效应对新型电力系统的发展趋势。

在优化送端控制方面,文献[12]提出故障时风机侧使用定无功功率控制,同时提高直流控制电流指令值的过电压协调抑制策略。文献[13]运用故障不同阶段电压的轨迹灵敏度建立二次规划模型,协调送端系统内所有无功调节设备,抑制暂态过电压。文献[14]基于直流闭锁故障发生后切除电容器对系统暂态过电压特性影响机理的分析,提出闭锁后保留部分整流站电容器的控制策略,以提升交流外送线路电压的稳定性。上述文献虽对暂态过电压进行了一定程度的抑制,但均未从根本上解决无功盈余的问题,调相机作为性能优越的无功补偿装置在上述研究中并未得到考虑。

针对我国送受端动态无功储备和特高压直流电压支撑不足的突出问题,要求直流大规模有功输送必须匹配大规模动态无功,即“大直流输电、强无功支撑”。相比于 SVC、STATCOM 等反馈控制型静止无功源,调相机故障瞬间响应速度较快,对直流闭锁引起的送端电网暂态过电压的抑制效果优于 SVC 和 STATCOM^[15-17]。而研究调相机对直流闭锁送端暂态过电压进行抑制时,一些学者从调相机控制策略入手进行研究,文献[18]协调了多直流换流站的调相机,减小了直流故障发生概率,降低了故障发生后的暂态过电压抬升程度。文献[19]通过分析稳态无功出力及暂态过程中调相机与电容、电抗的协调控制机理,提出了一种调相机与交直流电网之间的协调多目标无功控制策略。文献[20]利用静止变频器与调相机启停协调配合,提升了调相机应对暂态过电压的能力。另外一些学者从调相机容量配置入手进行研究。文献[21]通过综合考虑各电气参数影响下的调相机容量配置,提出了调相机优化配置方案。文献[22]利用暂态过电压面积法对暂态过电压故障程度进行衡量,并基于此对调相机进行选址及容量配置。文献[23]基于新能源机组高/低电

压安全穿越标准建立了暂态过电压安全评估指标,提出了调相机安装站点优选方法。以上研究虽然分别从调相机自身控制或者优化调相机容量配置方面提升调相机抑制暂态过电压的效果,但调相机无功出力对暂态过电压的抑制潜力未得到深入的挖掘。

因此,为了深度挖掘调相机对暂态过电压的抑制潜力,本文从分析调相机短路电流、无功出力及励磁控制参数 V_{ref} 对暂态过电压的影响入手,推导出在直流闭锁故障下调相机无功出力与暂态过电压的定量关系表达式,并以此进一步确定调相机动态励磁控制参考信号,最后提出一种应对直流闭锁故障的调相机励磁控制参数优化策略,提升了调相机对暂态过电压的抑制能力,并基于 PSCAD 仿真平台验证策略的有效性。

1 调相机对直流闭锁故障下暂态过电压的影响

1.1 暂态电压影响因子

直流闭锁故障后送端等值电路由图 1 所示。图中: U_c 为送端交流系统等值电压源等值电势; X_r 、 X_n 分别为送端、受端等值电抗; i_i 表示调相机短路电流; Q_v 、 Q_l 分别为送端、受端系统正常运行下滤波器无功补偿量; Q_i 为调相机无功出力; Q_z 为直流闭锁故障后送端系统无功盈余量。电力系统稳定运行时,交直流系统的有功与无功功率之间的传输都是保持基本平衡的,调相机加入前,系统发生直流闭锁时的直流侧相当于断路,直流功率迅速下降,换流站停止无功消耗,此时,交流滤波器存在投切延时问题无法及时切除,继续向换流站补偿大量的无功功率,从而使所补偿的多余无功 Q_z 在送端交流系统大量堆积,造成换流母线处发生暂态过电压。

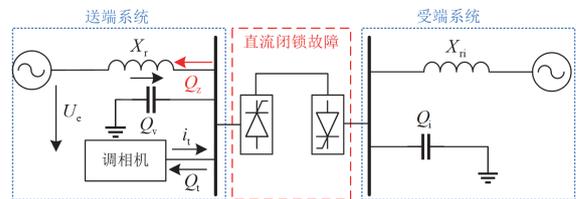


图 1 直流闭锁故障后送端等值电路图

Fig. 1 Sending-end equivalent circuit diagram after DC blocking fault

直流闭锁故障下送端暂态过电压 U_m 表达式如式(1)^[24]所示。

$$U_m = \frac{\left(1 - \sqrt{1 - \frac{12Q_v}{S_D}}\right)}{\left(\frac{6Q_v}{S_D}\right)} U_c \quad (1)$$

式中, S_D 为短路容量。由式(1)可知暂态过电压的大小与系统无功补偿量及短路容量有关, 由此, 针对闭锁状态下暂态过电压的抑制可从无功补偿与提升短路容量两方面入手。此时不妨设一个影响因子 W , 将系统无功补偿量与短路容量看作一个整体,

令 $W = \frac{Q_v}{S_D}$, 即暂态过电压表达式为

$$U_m = \frac{(1 - \sqrt{1 - 2W})}{W} U_c \quad (2)$$

由式(2)可以看出, 暂态过电压 U_m 与 W 的函数关系呈现正相关, 因此, 通过降低 W 可达到抑制暂态过电压的目的。

1.2 调相机对暂态过电压影响分析

调相机接入系统前, 由于换流站停止无功功率的消耗, 滤波器补偿的无功全部倒送至送端交流系统, 此时系统无功量盈余等于滤波器无功补偿量, 即 $Q_z = Q_v$ 。调相机接入后, 通过在闭锁故障期间吸收交流系统大量感性无功盈余, 有效降低了暂态过电压。设置 1 s 时发生闭锁故障, 故障持续时间为 0.2 s, 调相机控制参数为典型励磁控制参数, 如表 1 所示, 300 Mvar 调相机加入前后送端系统无功盈余量对比如图 2 所示。

表 1 典型励磁控制参数

Table 1 Typical excitation control parameters

V_{ref}	T_1	T_A	T_B	T_E	K
17.25	0.02	0.05	0.2	0.001	2.5

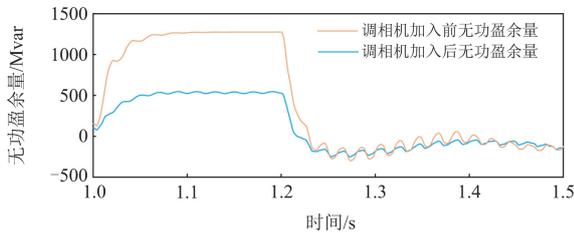


图 2 调相机加入前后送端系统无功盈余量对比

Fig. 2 Comparison of the reactive power surplus of the sending-end system before and after the addition of the condenser

表 1 中: V_{ref} 为给定控制参数; T_1 、 T_A 、 T_B 、 T_E 、 K 分别为整流器平滑时间常数、超前时间常数、滞后时间常数、励磁器时间常数及励磁器增益。

可以看出, 调相机的加入使直流闭锁故障发生后送端系统无功盈余从 1300 Mvar 降至 500 Mvar 左右, 此时, 交流系统无功平衡关系式变为 $Q_z = Q_v - Q_t$ 。

调相机的加入还可以有效提升系统短路电流, 增加系统短路容量, 降低暂态过电压, 300 Mvar 调相机加装前后送端交流母线处三相短路电流、短路容量及短路比如表 2 所示。

表 2 不同方案下送端系统短路电流、短路容量及短路比
Table 2 Short-circuit current, short-circuit capacity and short-circuit ratio of the sending-end system under different schemes

方案	短路电流/kA	短路容量/MW	短路比
无调相机	5.64	3370	3.18
有调相机	8.54	5103	4.86

由图 2 及表 2 可知, 调相机作为旋转设备, 不仅能有效吸收系统多余无功, 还会增加系统短路电流, 提升短路容量, 增加短路电流 2.9 kA, 提升短路比 1.68。

由上述分析, 调相机的加入会显著降低无功盈余, 增加短路电流, 提升短路容量, 此时式(2)中 W 可进一步表示为 W_1 , 如式(3)所示。

$$\begin{cases} W_1 = \frac{2Q_z}{(i_D + i_t)U_N} \\ Q_z = Q_v - Q_t \\ S'_D = 3(i_D + i_t)U_N \end{cases} \quad (3)$$

式中: W_1 为加入调相机后的影响因子; i_D 为系统短路电流; S'_D 为调相机加入后的系统短路容量; U_N 为母线额定相电压。

2 调相机励磁控制参数对暂态过电压的影响

励磁控制环节为调相机的暂态特性阶段, 暂态状态下, 调相机是由励磁系统检测机端电压来控制无功出力的, 强励状态下会发出两倍以上无功功率, 对暂态过电压抑制作用明显。暂态状态下调相机的无功出力受强励倍数、暂态参数以及端电压变化的影响^[25]。

2.1 调相机励磁控制系统

调相机励磁控制系统及其传递函数分别如图 3、图 4 所示。

图 3 中: E_m 为整流前调相机机端电压; E_{FD} 为调相机励磁电压; 励磁系统所测的端电压与给定控制参数作对比, 经过励磁调节器与功率单元, 输出调节端电压的励磁电压, 维持端电压稳定。控制励磁电压输出的励磁系统传递函数主要有参考指令给定、电压测量、两级超前滞后校正、移相整流及相

应的限幅环节等。图 4 中： E_t 为整流后检测的调相机机端电压； F_{LD} 为励磁信号通过负电流逻辑与各环节相互配合输出的励磁电压。

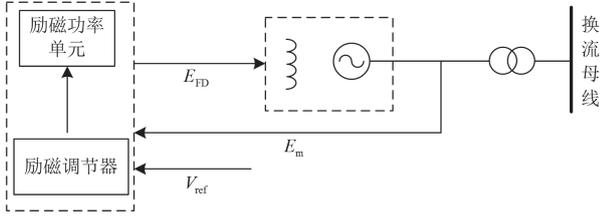


图 3 调相机励磁控制系统

Fig. 3 Condenser excitation control system

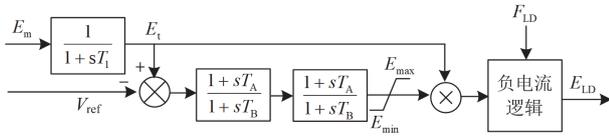


图 4 励磁控制系统传递函数

Fig. 4 Excitation control system transfer function

2.2 调相机励磁控制参数对暂态过电压影响分析

调相机励磁系统以机端定子电压为目标，通过励磁调节器维持机端电压稳定，故障状态下，励磁系统通过调节机端电压与给定参考电压一致来应对故障的发生。当系统发生直流闭锁故障时，送端交流母线处会堆积大量无功，使母线产生暂态过电压，此时调相机变压器二次侧电压增大，为保证一次侧机端电压不会上升，励磁控制系统根据调相机机端电压与给定控制参数对比，快速调整励磁电压与励磁电流，从而调节调相机的无功出力，吸收交流母线堆积的无功，维持系统电压的稳定。

在其他励磁参数不变的条件下，观察不同励磁控制参数 V_{ref} 对闭锁故障下暂态过电压以及调相机出力的影响，分别如图 5、图 6 所示。

由图 5、图 6 可以看出：不同控制参数下，暂态过电压受抑制情况不同，随着控制参数 V_{ref} 的减小，其抑制程度不断加深，而调相机的出力也受控

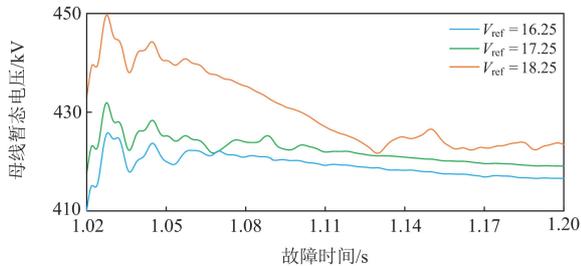


图 5 不同励磁控制参数 V_{ref} 对暂态过电压的影响

Fig. 5 Effect of different excitation control parameters V_{ref} on transient overvoltage

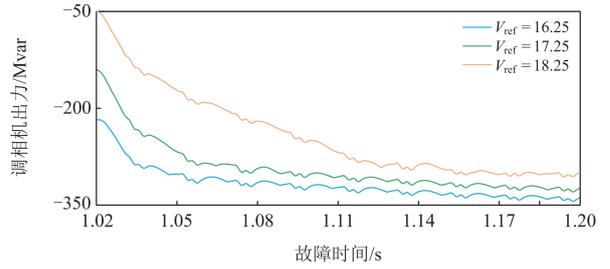


图 6 不同励磁控制参数 V_{ref} 对调相机出力的影响

Fig. 6 Influence of different excitation control parameters V_{ref} on the output of condenser

制参数的影响，其无功出力随控制参数 V_{ref} 的减小而增大，最终会达到出力阈值。

由上述结果分析可以看出，控制参数 V_{ref} 的单一化并不能充分挖掘调相机无功出力抑制暂态过电压的动态性能，因此，通过对调相机无功出力与暂态过电压进行定量分析制定动态控制参数是非常有必要的。

3 调相机励磁控制参数优化策略

3.1 调相机无功出力与暂态电压的定量计算

由式(2)可以整理出暂态电压表征 W 的关系式，如式(4)所示。

$$W = \frac{2(U_m - U_e)U_e}{U_m^2} \quad (4)$$

将加入调相机后的影响因子 W_1 代入式(4)可推知

$$Q_t = Q_v - \frac{(U_m - U_e)U_e(i_D + i_t)U_N}{U_m^2} \quad (5)$$

可以看出，调相机的无功出力与暂态电压呈现一定的关联性，假设闭锁故障下滤波器向系统输送的无功功率为 Q_u ，故障前传输的无功功率等于送端系统正常运行下滤波器的无功补偿量，由于滤波器输送的无功功率与换流母线暂态过电压平方成正比^[26]，此时有 $Q_u = (U_m/U_N)^2 Q_v$ ，将 Q_v 用故障状态下的 Q_u 替换，可得到含暂态过电压与调相机无功出力的表达式为

$$Q_t = \frac{Q_u U_N^2}{U_m^2} - \frac{(U_m - U_e)U_e(i_D + i_t)U_N}{U_m^2} \quad (6)$$

可知，除无功量与暂态过电压量外还存在调相机短路电流与交流系统短路电流两个相关量。

已知交流系统短路容量与母线额定相电压，可求得系统短路电流，具体公式为

$$i_D = \frac{S_D}{3U_N} \quad (7)$$

在讨论调相机的暂态特性时通常忽略阻尼绕组和定子绕组的过渡过程, 故当发生闭锁故障时暂态状态下调相机短路电流表达式如式(8)^[27]所示。

$$i_t = \frac{U_m - U_N}{X'_d - X_d} \quad (8)$$

式中, X'_d 、 X_d 分别为调相机暂态与稳态电抗。

3.2 调相机暂态电抗计算

当故障发生后, 调相机会先后经过超瞬变、瞬变、稳态 3 个阶段, 对应的直轴电抗分别为 X''_d 、 X'_d 、 X_d , 其中 X''_d 为调相机次暂态电抗。当调相机进入次暂态状态时, 设此时直轴去磁磁通为 Φ''_d , 定子磁动势为 F_d , 根据磁路定律可知

$$F_d - F_Z - F_D = \Phi''_d R_{ad} \quad (9)$$

式中: F_D 、 F_Z 分别为阻尼绕组、励磁绕组反电动势; R_{ad} 为磁路磁阻。

而维持磁路守恒必须满足阻尼绕组漏磁通、励磁绕组漏磁通以及直轴去磁磁通三者相等, 由磁路欧姆定律可知

$$\begin{cases} F_d = \Phi''_d R_{D\sigma} \\ F_Z = \Phi''_d R_{F\sigma} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $R_{F\sigma}$ 、 $R_{D\sigma}$ 分别为励磁、阻尼磁阻。

将(10)代入式(9)得到式(11)。

$$F_d = \Phi''_d (R_{ad} + R_{D\sigma} + R_{F\sigma}) \quad (11)$$

可以看出, 直轴去磁磁通磁阻为 R_{ad} 、 $R_{F\sigma}$ 、 $R_{D\sigma}$ 三者之和, 且磁导与磁阻互为倒数, 所以定子直轴超瞬变总磁导 A''_d 为

$$A''_d = A_0 + \frac{1}{\frac{1}{A_{ad}} + \frac{1}{A_{D\sigma}} + \frac{1}{A_{F\sigma}}} \quad (12)$$

式中, A_0 为漏磁导; A_{ad} 为磁路磁导; $A_{D\sigma}$ 为阻尼磁导; $A_{F\sigma}$ 励磁磁导。由于磁导与电抗为一一对应关系, 即闭锁状态下调相机次暂态电抗为

$$X''_d = X_0 + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{D\sigma}} + \frac{1}{X_{F\sigma}}} \quad (13)$$

式中: X_0 为定子绕组漏抗; X_{ad} 为电枢反应电抗; $X_{D\sigma}$ 为直轴阻尼绕组漏抗; $X_{F\sigma}$ 为转子绕组漏抗。

调相机从次暂态过渡到暂态过程时, 阻尼绕组中的电流衰减完毕, 次暂态过程中的阻尼绕组消失, 由式(13)可知, 调相机暂态电抗的等效电路如图 7 所示。

因为转子漏抗 $X_{F\sigma}$ 较电枢反应电抗 X_{ad} 小很多, 所以暂态电抗可表示为

$$X'_d \approx X_0 + X_{F\sigma} \quad (14)$$

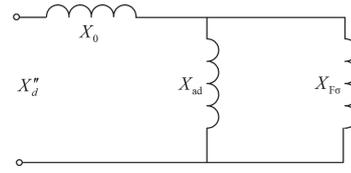


图 7 暂态电抗等效电路图

Fig. 7 Transient reactance equivalent circuit diagram

由上述分析将式(7)、式(8)、式(14)代入式(6)可知, 调相机无功出力与闭锁故障下暂态过电压的定量计算表达式为

$$Q_t = \frac{Q_u U_N^2}{U_m^2} - \frac{(U_m - U_c) U_c \left(\frac{S_D}{3U_N} + \frac{U_m - U_N}{X_{\sigma} + X_{D\sigma} - X_d} \right) U_N}{U_m^2} \quad (15)$$

由式(15)所计算的故障状态下的调相机动态无功出力可知, 此时调相机端电压值如式(16)所示。

$$U_D = \sqrt{Q_t X'_d} \quad (16)$$

3.3 调相机励磁系统参数优化策略

在暂态励磁控制中, 不同给定参考值对调相机无功出力的影响不同, 且单一固定值并不能很好地控制调相机的出力, 通过计算出的调相机出力与暂态过电压的定量关系给定动态控制参数, 以达到控制调相机进行最优出力的目的, 结合式(15)、式(16)提出一种调相机励磁控制参数优化策略。根据式(15)对调相机进行无功定量计算, 以计算结果作为励磁控制系统的无功输出标准, 根据式(16)计算出的调相机机端电压确定励磁环节中的动态参考电压 V'_{ref} , 达到根据实际故障量来补偿系统无功的需求。

控制框图如图 8 所示。控制框图中 x^2 模块含义为变量的平方, N/D 模块含义为 N 除 D。新加入的策略将推算出的动态 U_D 替代了原有的固定参考值 V_{ref} , 具体作用机理为: 当送端发生直流闭锁故障时, 励磁控制系统根据暂态过电压的大小, 计算出所对应的调相机机端电压, 将其作为动态电压参考值 V'_{ref} , 并与故障时调相机机端电压进行比较, 其差值经过 PID 控制环节、励磁器增益环节和限幅环节输出控制信号, 此控制信号与励磁电流转化的励磁信号 F_{LD} 相配合, 通过负电流逻辑单元输出系统所需无功补偿量所对应的励磁电压, 改变调相机机端电压并对系统进行一定的无功补偿。

闭锁故障发生后, 调相机会经过次暂态、暂态以及稳态 3 个过程, 次暂态过程是电磁变化, 与励磁系统无关, 励磁系统控制部分为暂态状态, 当设置 1 s 发生闭锁故障时, 用延时装置令调相机在暂态状

态时投入此控制策略，闭锁故障发生后次暂态过程持续时间大约 20 ms，然后进入暂态阶段。闭锁故障持续时间为 0.2 s。此控制策略能深度挖掘调相机抑制暂态过电压的能力，即故障状态下调相机对暂态过电压的抑制更加动态化。

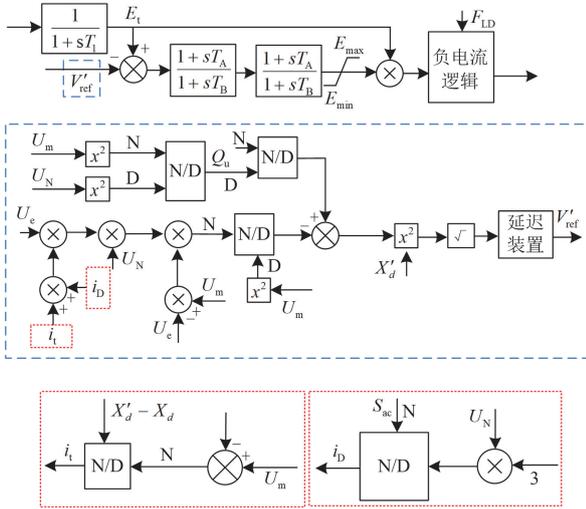


图 8 加入所提控制策略后的励磁系统控制框图
Fig. 8 Block diagram of excitation system control after adding the proposed strategy

4 仿真验证

通过 PSCAD 平台搭建含调相机的交直流混联系统，对调相机励磁参数优化策略在暂态过电压抑制中的应用进行验证，以 300 MVA 调相机为例，参数如表 3 所示。

表 3 调相机参数
Table 3 Condenser parameters

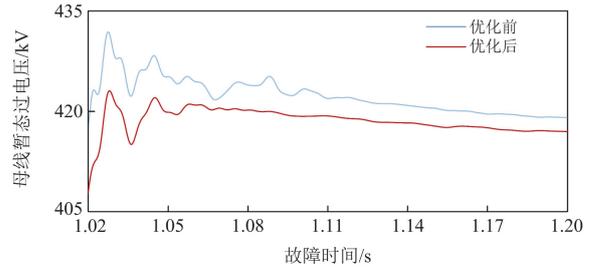
参数	数值	参数	数值
额定无功功率/Mvar	300	直轴同步电抗/p.u.	1.505
额定电流/kA	8.66	直轴暂态电抗/p.u.	0.124
额定电压/kV	20	直轴次暂态电抗/p.u.	0.104
额定频率/Hz	50	电枢电阻定子漏抗/p.u.	0.0025

为验证策略的有效性，设置 4 组容量分别为 300 Mvar、400 Mvar、500 Mvar 以及 600 Mvar 的调相机，设置送端交流系统于 1 s 时发生直流闭锁故障，并延时 20 ms 后投入优化策略，滤波器投切时间约为 200 ms，设故障持续时间为 0.2 s，得出优化前后母线暂态过电压与调相机无功出力分别如图 9、图 10 所示。优化前后换流母线暂态过电压及不同容量调相机无功出力对比如表 4、表 5 所示。

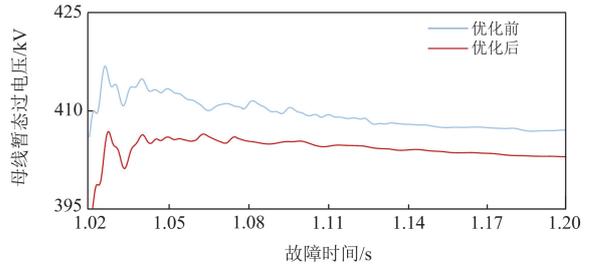
由表 4 可知， V_{ref} 优化前后的换流母线暂态过电压值均为故障发生期间暂态过电压的最大值，优化量则为优化前后两者差额。

由表 5 可以看出，调相机出力均为 V_{ref} 优化前后调相机故障期间出力的平均值，优化量则为优化前后两者差额。

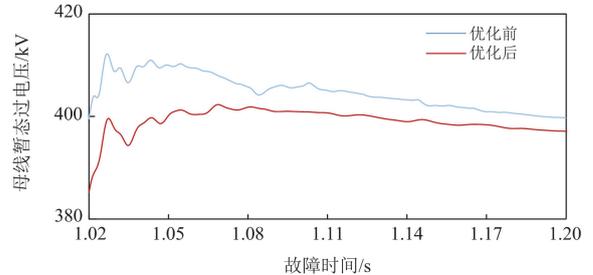
由图 9 及表 4 可以看出，在加入优化策略后，不同容量调相机对暂态过电压的抑制能力都会得到提升，抑制后暂态过电压相较之前更加平稳。由优化前后的暂态过电压最大值可以看出，其暂态过电压优化量保持在 0.029 p.u. 以上，优化效果明显。



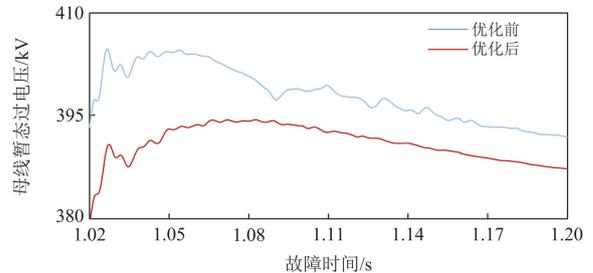
(a) 300 Mvar 调相机 V_{ref} 优化前后母线暂态过电压对比



(b) 400 Mvar 调相机 V_{ref} 优化前后母线暂态过电压对比



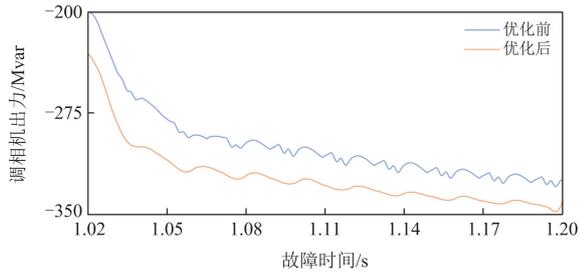
(c) 500 Mvar 调相机 V_{ref} 优化前后母线暂态过电压对比



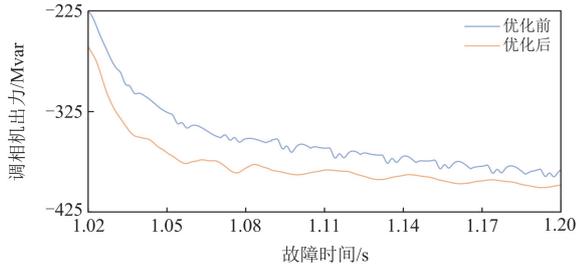
(d) 600 Mvar 调相机 V_{ref} 优化前后母线暂态过电压对比

图 9 不同容量调相机 V_{ref} 优化前后母线暂态过电压

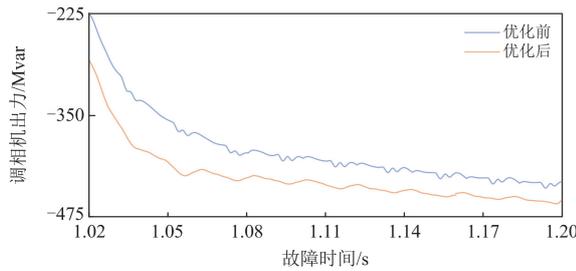
Fig. 9 Transient overvoltage at bus before and after optimization of V_{ref} for condensers with different capacity



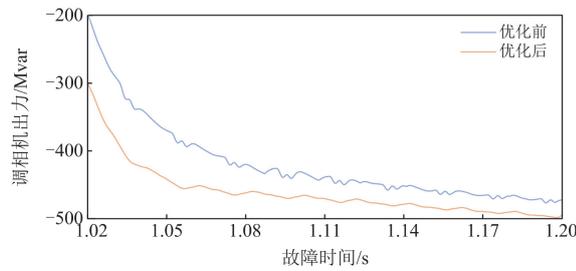
(a) 300 Mvar调相机优化前后出力对比



(b) 400 Mvar调相机优化前后出力对比



(c) 500 Mvar调相机优化前后出力对比



(d) 600 Mvar调相机优化前后出力对比

图 10 不同容量调相机 V_{ref} 优化前后出力对比Fig. 10 Comparison of output before and after V_{ref} optimization for condensers with different capacity

由图 10 及表 5 可以看出,不同容量调相机加入优化策略后都能够较之前发挥更大出力性能,优化前后调相机平均出力变化较为明显,且随着调相机容量的不断上升,优化量在不断增加,最大优化量为 75 Mvar。

与上述故障设置一致,设置 1 s 时发生闭锁故障,故障持续时间为 0.2 s,此时 300 Mvar 调相机

优化前后与其他无功装置对暂态过电压的抑制效果对比如图 11 和表 6 所示。

表 4 V_{ref} 优化前后母线暂态过电压对比Table 4 Comparison of bus transient overvoltage before and after V_{ref} optimization

调相机容量/ MVA	Q_v /Mvar	暂态过电压/p.u.		优化量/ p.u.
		优化前	优化后	
300	600	1.255	1.220	0.035
400	600	1.223	1.188	0.035
500	600	1.194	1.162	0.032
600	600	1.171	1.142	0.029

表 5 V_{ref} 优化前后调相机出力对比Table 5 Comparison of condenser output before and after V_{ref} optimization

调相机容量/ MVA	Q_v /Mvar	调相机出力/Mvar		优化量/ Mvar
		优化前	优化后	
300	600	232	286	54
400	600	269	331	62
500	600	298	368	70
600	600	321	396	75

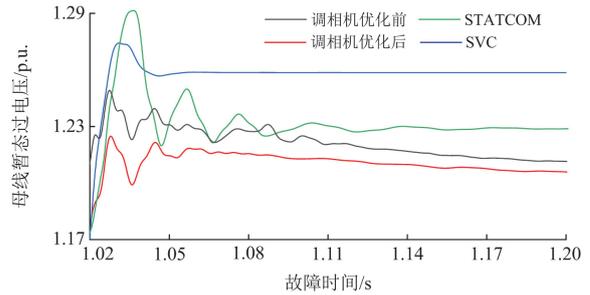


图 11 直流闭锁故障下调相机优化前后与其他无功补偿装置的比较

Fig. 11 Comparison between synchronous condensers and other reactive power compensation devices before and after optimization under DC blocking faults

表 6 直流闭锁故障送端换流母线电压

Table 6 Sending-end converter bus voltage under DC blocking fault

无功补偿装置	故障前母线	暂态过电压	抑制量/p.u.
	电压/p.u.	峰值/p.u.	
不加补偿装置	1.000	1.490	0.000
SVC	1.001	1.265	0.224
STATCOM	1.006	1.291	0.193
优化前调相机	0.986	1.255	0.249
优化后调相机	0.997	1.220	0.267

闭锁故障发生后,不同无功补偿装置对暂态过电压都进行了一定的抑制,由图 11 可以看出,无功

补偿装置中，STATCOM 峰值最高，但相较于 SVC 其暂态过电压抑制效果更好，SVC 对暂态过电压的抑制则较为稳定但效果最差，调相机抑制效果最优，由表 6 可以看出，优化后的调相机抑制量为 0.267 p.u.，优化量最大，相比优化前抑制量提升了约 0.02 p.u.，且暂态过电压更稳定。

在直流侧，300 Mvar 调相机励磁控制参数 V_{ref} 优化前后直流电流与直流电压对比分别如图 12、图 13 所示。

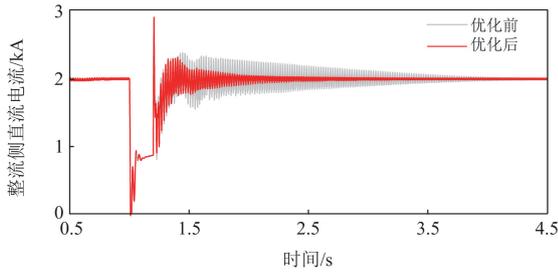


图 12 V_{ref} 优化前后直流侧直流电流

Fig. 12 DC side DC current before and after V_{ref} optimization

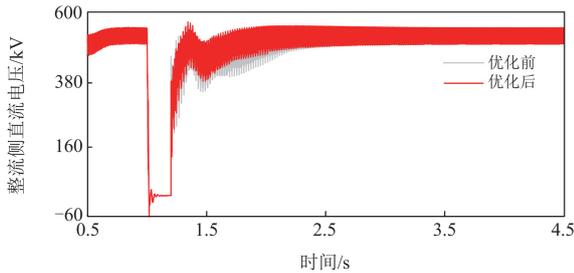


图 13 V_{ref} 优化前后直流侧直流电压

Fig. 13 DC side DC voltage before and after V_{ref} optimization

由于调相机自身容量与直流电流及直流电压大小并没有直接关系，所以以 300 Mvar 调相机为例观察优化前后 V_{ref} 对直流电流与电压的影响，从图 12、图 13 可以看出，闭锁故障期间直流侧相当于断路调相机对直流电流及直流电压无影响，故障恢复期间，优化后直流电流更快恢复至稳态状态 2 kA 左右，提升了系统对直流电流的故障恢复能力，直流电压也更快到达其稳态数值 500 kV。综上所述，仿真验证了该策略对于挖掘调相机出力潜力、提升调相机抑制暂态过电压能力的有效性，且在一定程度上能提升直流侧系统对于直流电流与直流电压的故障恢复能力。

5 结论

闭锁故障作为最常见的直流故障，产生的暂态过电压对交流系统会带来严重冲击，因此需提供合

理有效的无功支撑设备来抑制暂态过电压。调相机不同于 STATCOM、SVC 等无功补偿装置，在瞬时无功支撑方面具有其独特的优势。本文从调相机与暂态过电压的定量关系入手，探索了闭锁故障下调相机无功出力与母线暂态过电压的内在联系，得出如下结论。

(1) 整理出闭锁故障下调相机无功补偿与换流母线暂态过电压之间的相互关系，提出了一种适用于闭锁故障下抑制暂态过电压的调相机励磁控制系统参数优化策略，暂态过电压较优化前下降 0.029 p.u.，优化效果明显，且相较于 SVC、STATCOM 能达到更高的暂态过电压抑制水平。

(2) 所提策略不仅能使调相机在容量不变的前提下达到更大出力，提升其抑制暂态过电压的出力性能，还能有效加快直流侧直流电流及电压在故障恢复期间的恢复速度，使两者更快地达到稳定状态。

(3) 文中使用 PSCAD 软件建立含调相机的交直流混联输电系统，与实际系统会存在偏差(如表 6 所示稳态时母线电压并未严格在 1.0 p.u.)，调相机在暂态过程中会忽略一定的过渡过程(例如对本文影响较小的定子绕组与阻尼绕组的过渡过程)，这也会导致一定误差，但对最终结果不会产生较大影响。本文从调相机暂态特性出发制定优化策略，并未对其次暂态过程进行研究，后续将针对次暂态过程或者调相机全过程进行研究。

参考文献

[1] 李宽, 黄强, 吕学宾, 等. 抑制高压直流系统后续换相失败的定关断角控制改进方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 109-119.

LI Kuan, HUANG Qiang, LÜ Xuebin, et al. Enhanced extinction angle control for subsequent commutation failure mitigation in HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 109-119.

[2] 曹善康, 魏繁荣, 林湘宁, 等. 一种基于自适应电压限值的换相失败抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 165-175.

CAO Shankang, WEI Fanrong, LIN Xiangning, et al. A commutation failure suppression strategy based on adaptive voltage limits[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 165-175.

[3] 张建坡, 史茂华, 卢亚军, 等. 换相失败下直流控制参数对送端暂态电压影响机理分析[J]. 智慧电力, 2024, 52(3): 71-79.

ZHANG Jianpo, SHI Maohua, LU Yajun, et al. Influence mechanism analysis of DC control parameters on transient voltage of sending system under commutation failure

- condition[J]. *Smart Power*, 2024, 52(3): 71-79.
- [4] 刘浩宇, 刘挺坚, 刘友波, 等. 基于图卷积神经网络的直流送端系统暂态过电压评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(23): 71-81.
LIU Haoyu, LIU Tingjian, LIU Youbo, et al. A method for evaluating transient overvoltage of an HVDC sending-end system based on a graph convolutional network[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(23): 71-81.
- [5] 沈政委, 孙华东, 汤涌, 等. 传统交流电网与高比例新能源电网连锁故障差异性分析[J]. *电网技术*, 2021, 45(12): 4641-4649.
SHEN Zhengwei, SUN Huadong, TANG Yong, et al. Analysis of cascading failure differences between traditional AC power grid and high-proportion new energy Power grid[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(12): 4641-4649.
- [6] 毛安家, 马静, 蒯圣宇, 等. 高比例新能源替代常规电源后系统暂态稳定与电压稳定的演化机理[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(9): 2745-2756.
MAO Anjia, MA Jing, KUAI Shengyu, et al. Evolution mechanism of transient and voltage stability for power system with high renewable penetration level[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(9): 2745-2756.
- [7] 孙大卫, 吴林林, 刘辉, 等. 弱电网直驱风机低电压穿越特性及其对机端暂态电压的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(14): 4777-4786.
SUN Dawei, WU Linlin, LIU Hui, et al. Effect of the low voltage ride through characteristics on PMSG terminal transient voltage in weakly-synchronized grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(14): 4777-4786.
- [8] 刘其辉, 董楚然, 吴勇, 等. 直流换相失败下双馈风电机组特性描述及暂态过电压抑制[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(8): 29-38.
LIU Qihui, DONG Churan, WU Yong, et al. Characteristic description and transient overvoltage suppression of doubly-fed wind turbines with LCC- HVDC commutation failure[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(8): 29-38.
- [9] 刘辉, 王阔. 新能源低电压穿越无功电流对暂态电压安全约束的影响[J]. *中国电力*, 2022, 55(2): 152-158.
LIU Hui, WANG Kuo. LVRT reactive current index of renewable units based on the constraints of transient voltage[J]. *Electric Power*, 2022, 55(2): 152-158.
- [10] 王熙纯, 刘纯, 林伟芳, 等. 风机故障穿越特性对大规模风电直流外送系统暂态过电压的影响及参数优化[J]. *电网技术*, 2021, 45(12): 4612-4621.
WANG Xichun, LIU Chun, LIN Weifang, et al. Influence of wind turbine fault ride-through characteristics on transient overvoltage of large-scale wind power DC transmission systems and parameter optimization[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(12): 4612-4621.
- [11] 范世源, 杨贺雅, 向鑫, 等. 具有直流故障穿越能力的模块化多电平换流拓扑推演与对比[J]. *中国电力*, 2021, 54(10): 38-45.
FAN Shiyuan, YANG Heya, XIANG Xin, et al. Derivation and comparison of modular multilevel converter topologies with DC fault ride-through capability[J]. *Electric Power*, 2021, 54(10): 38-45.
- [12] 骆悦, 姚骏, 张田, 等. 大规模风电直流外送系统单极闭锁场景下送端系统协调控制策略[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(19): 4108-4118.
LUO Yue, YAO Jun, ZHANG Tian, et al. Coordinated control strategy of large-scale wind power generation sending system under mono-polar block fault[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(19): 4108-4118.
- [13] 王长江, 姜涛, 刘福锁, 等. 基于轨迹灵敏度的暂态过电压两阶段优化控制[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(9): 1888-1900, 1913.
WANG Changjiang, JIANG Tao, LIU Fusuo, et al. Two-stage optimization control of transient overvoltage based on trajectory sensitivity[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(9): 1888-1900, 1913.
- [14] 张炎, 丁明, 韩平平, 等. 直流闭锁后风电送端系统暂态稳定及控制策略研究[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(17): 3714-3726.
ZHANG Yan, DING Ming, HAN Pingping, et al. Study on the transient stability and control schemes of the sending-end system involving wind power after UHVDC block[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(17): 3714-3726.
- [15] 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.
- [16] 林安妮, 黄永章, 林伟芳, 等. 不同动态无功补偿装置对直流系统故障引发送端暂态过电压的抑制效果对比[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2020, 41(4): 116-122.
LIN Anni, HUANG Yongzhang, LIN Weifang, et al. Comparison of suppression effect of different dynamic reactive power compensation devices for transient

- overvoltage caused by HVDC system faults[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 116-122.
- [17] PU Ying, ZHONG Qidi, LI Xuan, et al. Influence of synchronous condenser on voltage stability of HVDC[C]// Power & Energy Society General Meeting, 2018, Portland, OR, USA: 1-5.
- [18] 朱丽萍, 刘文颖, 邵冲, 等. 基于调相机与 SVC 协调的抑制高压直流送端风机脱网的控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 107-115.
- ZHU Liping, LIU Wenying, SHAO Chong, et al. Control strategy of suppressing wind turbine tripping based on coordination between synchronous condenser and SVC in sending-end network of HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 107-115.
- [19] XIAO Fan, CAO Kan, TANG Jinrui, et al. Study on coordinated multi-objective reactive control system of AC/DC power grid based on new-generation synchronous condenser[J]. Energy Reports, 2023, 9: 2140-2148.
- [20] ZHU Hongchao, ZHANG Jie, ZHANG Yin. Startup control strategies for pre-fabricated synchronous condensers using static frequency converters[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2708(1): 1-9.
- [21] 张建坡, 孟凡, 吴林林, 等. 基于电气参数加权占比的新能源场站分布式调相机容量配置研究[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 4185-4195.
- ZHANG Jianpo, MENG Fan, WU Linlin, et al. Research on distributed condenser capacity configuration of new energy field station based on the weighted proportion of electrical parameters index[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4185-4195.
- [22] ZHAO Mengyang, TANG Xiaobo, WANG Yu, et al. A new site selection method applied to Synchronous condenser's suppressing transient over-voltage at the sending end of new energy resources[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 632(4): 042013.
- [23] 杨金刚, 石振江, 何成明, 等. 提升高比例新能源送端电网暂态电压安全的调相机优化配置策略[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(2): 174-182.
- YANG Jingang, SHI Zhenjiang, HE Chengming, et al. Optimal configuration strategy of condenser for improving short-term voltage safety in a sending-end power grid with a high renewable penetration level[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(2): 174-182.
- [24] 王峰, 刘天琪, 丁媛媛, 等. 直流闭锁引起的暂态过电压计算方法及其影响因素分析[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3059-3065.
- WANG Feng, LIU Tianqi, DING Yuanyuan, et al. Calculation method and influencing factors of transient overvoltage caused by HVDC block[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3059-3065.
- [25] 李志强, 种芝芝, 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, ZHONG 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.
- [26] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析: 机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [27] 杨鑫. 新能源同步机提升电网电压稳定性的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- YANG Xin. Research on enhancing the voltage stability of power grid by motor-generator pair[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.

收稿日期: 2024-03-07; 修回日期: 2024-10-04

作者简介:

苑田润(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交直流输电系统暂态电压特性分析及抑制; E-mail: 321247476@qq.com

李凤婷(1965—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为可再生能源并网系统运行与控制; E-mail: xjlf2009@sina.com

尹纯亚(1994—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为含高比例新能源接入的交直流混联电网稳定运行与控制技术。E-mail: 1399132297@qq.com

(编辑 周金梅)