

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221732

考虑调相机饱和参数的分阶段励磁控制优化策略

袁彬, 李辉, 向学位, 曾韵竹, 谭宏涛, 梁力元

(输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

摘要: 针对常规励磁控制在故障期间未能充分发挥调相机暂态无功输出能力和难以准确有效地支撑电网电压的问题, 提出考虑调相机饱和状态下电机参数的分阶段励磁控制优化策略。首先, 推导调相机暂态无功输出表达式, 分析不同运行工况下饱和参数对调相机暂态无功特性的影响。其次, 基于调相机参数与输出无功的数学关系引入考虑饱和参数的无功增量, 分阶段优化励磁环节中内环电压参考值与外环 PI 控制。最后, 建立锡盟-泰州特高压直流输电系统的无功控制模型, 通过仿真验证励磁控制策略优化效果。研究成果为调相机的优化设计提供技术支持, 也对提高调相机的电网电压故障支撑能力和提升我国高压直流电网的电压稳定水平具有重要作用。

关键词: 调相机; 暂稳态电抗; 饱和参数; 励磁控制优化; 分阶段励磁

Optimization strategy of phased excitation control considering phase modulator saturation parameters

YUAN Bin, LI Hui, XIANG Xuewei, ZENG Yunzhu, TAN Hongtao, LIANG Liyuan

(China State Key Laboratory of Power Transmission and Distribution Equipment and System Safety and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract: There is a problem that conventional excitation control fails to make full use of the synchronous condenser transient nonfunction during the fault period. Also it is difficult to accurately and effectively support the voltage of the power network. Thus a staged excitation control optimization strategy considering the saturation parameters of the transformer is proposed. First, the expression of the transient reactive power output of the phase modulator is deduced, and the influence of saturation parameters and different operating conditions on the transient reactive power characteristics are analyzed. Second, based on the mathematical relationship between condenser parameters and output reactive power, reactive power increment considering saturation parameters is introduced to optimize the reference value of inner ring voltage and outer ring PI control in excitation links in stages. Finally, the reactive power control model of the Ximeng-Taizhou UHVDC transmission system is established, and the optimization effect of the excitation control strategy is verified by simulation. The results provide technical support for the optimal design of the phase modulators, and also play an important role in improving the power grid voltage fault support capacity of the phase modulators and the voltage stability level of China's HVDC power network.

This work is supported by the Key Project of Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (No. U1966213).

Key words: synchronous condenser; transient steady-state reactance; saturation parameter; excitation control optimization; staged excitation

0 引言

新一代大容量同步调相机的优势为无功输出能

基金项目: 国家自然科学基金项目联合基金项目资助(重点支持项目)(U1966213); 工信部高技术船舶科研项目资助(MC-202025-S02)

力受母线电压的变化程度影响小、提供旋转惯量、暂态特性强及响应快速, 能够提高高压直流(high voltage direct current, HVDC)系统抵御换相失败风险的能力^[1-2]。然而, HVDC 系统发生严重故障时, 调相机需要承受过电压、过电流、强励及深度进相等复杂工况, 调相机内部磁场饱和、畸变, 使得调相机实际暂稳态电抗参数与设定值不同, 进而导致

主要受暂稳态电抗影响的暂态无功特性发生变化。

目前,国内外学者针对高压直流系统换相失败产生机理和抑制措施展开了广泛研究。文献[3-8]分别从检测、控制、数据处理等方面提出了一些换相失败的解决方式,在高压直流系统中接入调相机成为抵御换相失败的一种重要方式。调相机由励磁控制调整其无功功率的输出,因此调相机的励磁控制对其暂态无功输出特性也有着重要影响。目前,调相机励磁控制中广泛采用的无功-电压双闭环控制^[9]中,暂态时由电压主导控制进行快速励磁,稳态时由无功主导控制保持稳定输出。而励磁的慢速无功环会导致调相机在故障恢复后持续输出无功,系统因冗余无功而出现暂态过电压的问题。

文献[10]对比无功-电压双闭环控制与附加电力系统电压调节器(power system voltage regulator, PSVR)控制策略,为调相机的励磁控制提供了参考依据。文献[11]分析了调相机在励磁控制方面与常规同步电机的区别,提出了励磁系统调差和低励限制等的配置方法、参数整定原则,并提出了结合自动电压调节器(automatic voltage regulator, AVR)的综合无功-电压控制策略,使调相机在快速响应的同时,兼顾无功外环的稳定运行。文献[12]在系统发生电压故障时,切除无功外环,仅保留电压内环的快速响应能力。文献[13]提出在励磁控制电压内环的电压参考值前附加 PI 控制,在电压波动较大时放大差值,提供更多的无功功率;在电压波动较小时,保证系统电压的稳定。文献[14]分析了无功电流与输出无功功率的关系,确定有效无功电流增益作为评价指标,以评估调相机的动态特性。通过对指标的频域敏感性分析,揭示了影响动态特性的主要激励参数及其优化规律。

调相机一般接入 HVDC 系统的受端或送端换流站中,而换流站中也会配置静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)及交流滤波器组等无功补偿装置。因此,有学者对调相机与换流站的协调控制策略进行研究。文献[15]分析了调相机励磁控制系统和不同励磁控制模式之间的切换逻辑。针对调相机所在的高压直流换流站及近区电网,主站建立二级电压控制区域,并对该区域实行无功协调控制。文献[16]对比分析了 HVDC 系统分别加装调相机、SVC 及 SATACOM 的无功补偿,但未对协调控制策略进行研究。文献[17]提出了调相机稳态运行采用定无功模式、暂态过程切换为定电压控制模式,交流滤波器采用定交流电压控制的策略。文献[18]以 HVDC 系统无功交换量及同步调相机剩

余可调无功容量为判据,下发交流滤波器组投切修正指令与同步调相机无功输出指令。提出了协调换流站滤波器、调相机及换流站近区同步机组的过电压抑制策略。文献[19]设计了一种牛市优化技术来控制无功功率,提高系统的稳定性。该混合系统基于小信号模型,采用不同的控制技术在 Matlab/Simulink 中进行了验证。文献[20]提出了协调换流站滤波器、调相机及换流站近区同步机组的过电压抑制策略。配置滤波器及调相机的无功输出,使调相机和同步机组无功输出增大,提供充足的无功备用。文献[21]提出稳态时根据投切滤波器指令调整调相机无功控制的无功-电压协调策略。文献[22]提出一种新型模块化卸荷电路拓扑实现风电场过剩功率的吸收,但其增加了子模块的设计复杂度和控制难度。文献[23]提出了一种功率转带控制策略,能够在一定程度上平衡故障后的盈余功率,但仍需要切负荷配合。文献[24]利用风电场与换流站间的协同控制,根据换流站直流侧电压前馈信号,通过变化趋势控制实现风电场减载,但该方法会导致系统的控制响应速度降低。

综上所述,在调相机参与 HVDC 系统换流站的协调控制策略中,主要利用交流滤波器组投切下发指令与实际投切动作之间的延时,调整调相机励磁控制中的参考电压,改变调相机无功输出,提前降低或升高母线电压,以解决交流滤波器组投切时,无功波动导致电压上升或下降超出稳态电压($\pm 2\%$ 额定电压)范围的问题。协调控制多侧重于稳态工况下调相机与换流站的协调,为充分发挥调相机的暂态无功能力,需针对 HVDC 系统受端电网电压故障暂态过程中调相机的励磁控制策略进行优化。

因此,本文针对常规励磁控制在故障期间未能充分发挥调相机暂态无功能力和难以准确有效地支撑电网电压的问题,提出考虑饱和参数的分阶段励磁控制优化策略。首先,推导调相机暂态无功输出表达式,分析不同运行工况下饱和参数对暂态无功特性的影响。其次,基于调相机参数与输出无功的数学关系引入考虑饱和参数的无功增量,分阶段优化励磁环节中内环电压参考值与外环 PI 控制。最后,建立锡盟-泰州特高压直流输电系统的无功控制模型,通过仿真验证励磁控制策略的优化效果。

1 调相机暂态无功运行特性分析

1.1 调相机暂态无功输出理论分析

根据文献[15]得到调相机机端电压突然变化时,定子超瞬变电流及瞬变电流的初始值。当调相

机端电压突然变化时, 定子电流中会产生非周期电流分量、二次谐波分量和基波分量。其中非周期电流分量和二次谐波分量逐渐衰减为零, 基波分量逐渐衰减为稳态值。由此可得到调相机机端电压突然变化时, 定子直轴与交轴电流为

$$\begin{cases} i_d = \left(\frac{-(K-1)U_0}{X_d''} + \frac{(K-1)U_0}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \\ \left(\frac{-(K-1)U_0}{X_d'} + \frac{(K-1)U_0}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} - \\ \frac{(K-1)U_0}{X_d} + \frac{(K-1)U_0}{X_d''} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos \omega t \\ i_q = -\frac{(K-1)U_0}{X_q''} e^{-\frac{t}{T_a}} \sin \omega t \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_d 和 i_q 分别为直、交轴定子电流; K 为电网电压变化程度; U_0 为调相机机端电压; X_d 为直轴同步电抗; X_d' 为直轴暂态电抗; X_d'' 为直轴次暂态电抗; X_q'' 为交轴次暂态电抗; T_d' 为直轴暂态开路时间常数; T_d'' 为直轴次暂态开路时间常数; T_a 为定子绕组暂态时间常数。

根据叠加定理可以得到调相机在稳态工况和暂态工况下的定子输出电流, 调相机在机端电压突然变化后定子实际电流为

$$\begin{aligned} i_{dk} = i_d + i_{d0} = & \left(\frac{-(K-1)U_0}{X_d''} - \frac{-(K-1)U_0}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \\ & \left(\frac{-(K-1)U_0}{X_d'} - \frac{-(K-1)U_0}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} + \\ & \frac{-(K-1)U_0}{X_d} + \frac{(K-1)U_0}{X_d''} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos \omega t + \frac{Q_0}{U_0} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: i_{dk} 为机端电压变化后定子实际电流; i_{d0} 为稳态工况定子电流; Q_0 为调相机初始无功。

由此可得调相机在机端电压突然变化后的暂态无功输出为

$$\begin{aligned} Q_k = u_q i_{dk} = KU_0 i_{dk} = & \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} + \frac{1}{X_d} \right] \cdot \\ & \left[(K-K^2)U_0^2 \right] + \frac{(K^2-K)U_0^2}{X_d''} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos \omega t + KQ_0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: u_q 为交轴机端电压; Q_k 为调相机暂态无功。

调相机在机端电压突然变化后的暂态无功增量为

$$\begin{aligned} \Delta Q_k = & \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} + \frac{1}{X_d} \right] \cdot \\ & [(K-K^2)U_0^2] + \frac{(K^2-K)U_0^2}{X_d''} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos \omega t + \\ & (K-1)Q_0 \end{aligned} \quad (4)$$

根据式(4)可知, 当电网电压跌落时 ($K < 1$), 在电网电压变化程度及调相机初始无功一定的情况下, 调相机在暂态过程中的无功增量与直轴电抗参数呈反比。在系统暂态过程中, 由于磁路饱和造成的调相机电抗参数减小, 会增大调相机在暂态过程中的无功增量。当电网电压骤升时 ($K > 1$), 在电网电压变化程度及调相机初始无功一定的情况下, 调相机的暂态无功增量与直轴电抗参数呈正比。随着调相机磁路饱和, 调相机暂态无功进相能力增加。

电网故障时, 调相机输出的次暂态无功由电网电压的变化程度决定。根据式(4)可知, 当调相机的电磁参数及初始无功恒定时, 调相机的暂态无功增量最大值与电网电压变化程度呈二次函数关系。

设定调相机初始无功 Q_0 为恒定值 0 p.u., 仅改变电网电压变化程度, 调相机其余参数设置如表 1 所示, 仿真计算得到不同电网电压变化程度下调相机暂态无功增量最大值变化规律如图 1 所示。

表 1 调相机参数设置

Table 1 Parameter settings of the synchronous condenser

调相机参数	设定值
直轴同步电抗 X_d / p.u.	1.415
直轴暂态电抗 X_d' / p.u.	0.141
直轴次暂态电抗 X_d'' / p.u.	0.097
直轴暂态开路时间常数 T_d' / s	7.44
直轴次暂态开路时间常数 T_d'' / s	0.05
定子绕组暂态时间常数 T_a / s	20.79

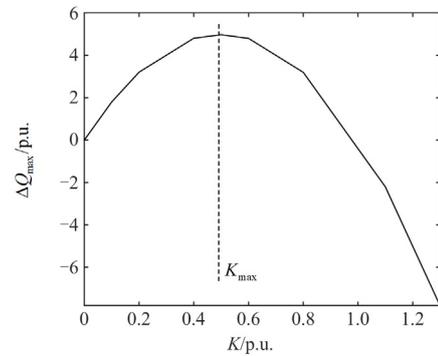


图 1 不同电网电压变化下调相机输出暂态无功增量最大值
Fig. 1 Maximum value of transient reactive power output of the synchronous condenser is reduced by the variation of grid voltage

从图 1 中可以看出, 当调相机的电磁参数及初始无功恒定时, 调相机的暂态无功增量最大值与电网电压变化程度呈二次函数关系, 与理论分析结果保持一致。

当电网电压突然骤升, 即 $K > 1$ 时, 调相机输出的暂态无功增量最大值随电网电压变化程度的增大而增大。当电网电压突然跌落, 即 $K < 1$ 时, 调相机输出的暂态无功增量最大值随电网电压变化程度先增大后减小。可定义调相机暂态无功增量最大值拐点为 K_{\max} 。在调相机参数、初始机端电压及初始无功为定值的情况下, 调相机的无功增量表达式可以简化为

$$\begin{cases} \Delta Q_{\max} = (B - A)K^2 + (A - B + Q_0)K - Q_0 \\ A = U_0^2 \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{1}{X_d} \right] \\ B = \frac{U_0^2}{X_d''} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos \omega t \end{cases} \quad (5)$$

则 K_{\max} 可以表示为

$$K_{\max} = 0.5 + \frac{Q_0}{2(A - B)} \quad (6)$$

式中, A 和 B 的值主要与调相机的参数及稳态运行时的电压 U_0 有关, 且 $A > 0$, $B < 0$ 。当 A 与 B 为定值时, K_{\max} 的大小主要与调相机的初始无功有关, 且当调相机的初始无功越小(即稳态进相运行时), 其对电网电压变化的支撑能力越强。

调相机的初始无功会影响其动态无功备用。由式(5)可知, 当电网电压跌落程度及调相机电磁参数一定时, 调相机的暂态无功增量最大值与调相机初始无功呈线性关系。

设定电网电压变化程度 K 分别为恒定值 0.4 p.u. ($K < 1$) 和 1.3 p.u. ($K > 1$), 仅改变初始无功, 调相机其余参数设置如表 1。调相机暂态无功增量最大值随初始无功变化规律的仿真计算结果如图 2 所示。

从图 2 中可以看出, 当调相机的电网电压变化程度 K 及其他电磁参数恒定时, 调相机的暂态无功增量最大值与调相机初始无功呈线性函数关系, 与理论分析结果保持一致。

当电网电压跌落时, 调相机所能输出的暂态无功增量最大值随调相机初始无功的增大而减小, 即调相机稳态工作在进相运行时, 可以为系统提供更多的动态无功储备。当电网电压暂升时, 随调相机初始无功的增大, 调相机暂态无功进相增量逐渐减小, 即调相机抑制电网过电压能力越弱。

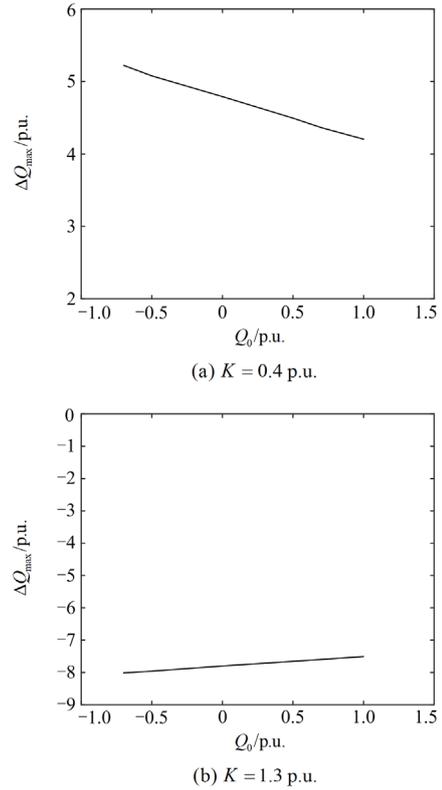


图 2 不同初始无功下调相机输出暂态无功增量最大值

Fig. 2 Maximum value of transient reactive power increment of the synchronous condenser under different initial reactive power

上述分析未考虑饱和和电抗参数的影响, 为分析暂稳态电抗饱和的影响, 将式(5)无功增量表示为直轴次暂态电抗、暂态电抗及同步电抗, 表达式分别为

$$\Delta Q_{X_d''} = \frac{1}{X_d''} e^{-\frac{t}{T_d''}} (K - K^2) U_0^2 + \frac{(K^2 - K) U_0^2}{X_d''} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos \omega t \quad (7)$$

$$\Delta Q_{X_d'} = \frac{1}{X_d'} (e^{-\frac{t}{T_d'}} + e^{-\frac{t}{T_d''}}) (K - K^2) U_0^2 \quad (8)$$

$$\Delta Q_{X_d} = \left(-\frac{1}{X_d} e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{1}{X_d} \right) (K - K^2) U_0^2 \quad (9)$$

式中: $\Delta Q_{X_d''}$ 为直轴次暂态电抗对应无功增量; $\Delta Q_{X_d'}$ 为直轴暂态电抗对应无功增量; ΔQ_{X_d} 为直轴同步电抗对应无功增量。

基于上述直轴暂稳态电抗的数学表达式, 分别对直轴暂稳态电抗的暂态无功增量进行分析。设置电压跌落为 0.4 p.u., 直轴暂稳态电抗的暂态无功增量如图 3 所示。

可以看出, 在故障发生瞬间直轴次暂态电抗 X_d'' 提供的无功增量最大, 然后逐渐衰减; 直轴暂

态电抗 X'_d 的无功增量在 0.2 s 时稳定, 并持续输出无功, 而直轴同步电抗 X_d 的无功增量非常小, 这是由于同步电抗主要影响调相机的稳态无功, 这与前文的分析一致。

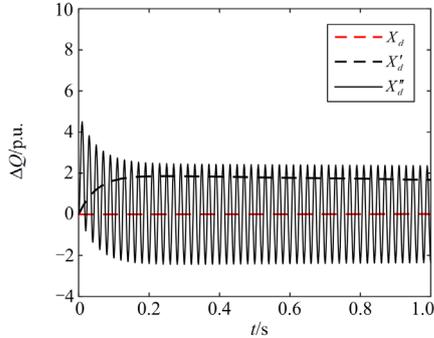


图 3 直轴暂稳态电抗的暂态无功增量

Fig. 3 Transient reactive power increment of direct axis transient and steady-state reactance

基于上述分析, 继续分析直轴暂稳态电抗饱和对其暂态无功增量的影响。设置电压跌落至 0.4 p.u., 饱和直轴暂稳态电抗的暂态无功增量如图 4 所示。饱和参数的设置中, 每次只改变一个参数分析同步电抗饱和时, 设置同步电抗为 1.148 p.u., 次暂态电抗与暂态电抗为不饱和参数值。饱和参数设置如表 2 所示, 不饱和参数设置如表 1 所示。

由图 4 可以看出: 饱和的次暂态电抗在故障瞬间发出的无功增量最大; 0.05 s 时, 饱和的暂态电抗发出的无功增量最大。因此, 可以考虑在故障瞬间及故障发生后期, 采用次暂态电抗与暂态电抗的

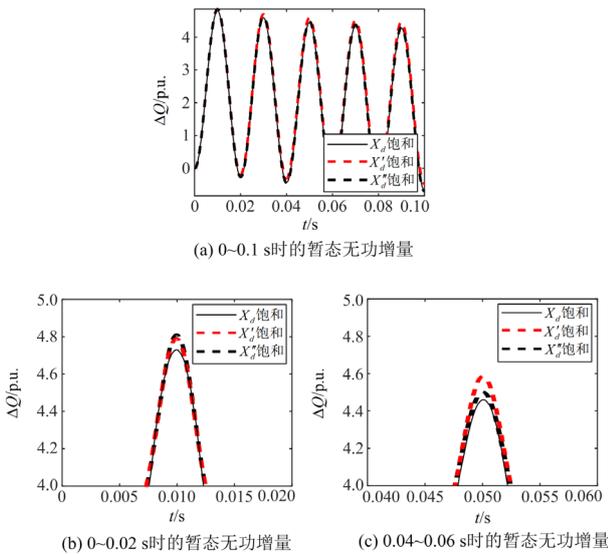


图 4 饱和直轴暂稳态电抗的暂态无功增量

Fig. 4 Transient reactive power increment of saturated direct-axis transient and steady-state reactance

表 2 调相机饱和参数设置

Table 2 Saturated parameter settings of the synchronous condenser

电抗参数	饱和值	电抗参数	饱和值
直轴同步电抗	1.148	交轴同步电抗	1.222
X_d /p.u.		X_q /p.u.	
直轴暂态电抗	0.124	交轴暂态电抗	1.222
X'_d /p.u.		X'_q /p.u.	
直轴次暂态电抗	0.096	交轴次暂态电抗	0.112
X''_d /p.u.		X''_q /p.u.	

饱和对电网电压进行支撑。

1.2 低电压故障下调相机暂态无功特性仿真分析

当特高压交直流系统发生故障时, 调相机需发挥其次暂态特性, 为系统提供无功支撑, 减少直流系统换相失败, 抑制系统过电压。在系统严重故障工况下, 由于调相机在暂态过程中定、转子电流突然增大, 会导致调相机内部磁场饱和, 从而导致调相机暂态参数减小, 进而影响调相机暂态无功输出特性。为了研究电网电压突然变化时调相机的暂态无功输出特性, 仿真分析参数饱和、不同电网电压变化程度及调相机初始无功对调相机最大暂态无功增量的影响。

1) 初始无功一定, 电压跌落至 0.4 p.u.

设置初始电压 $U_N = 1$ p.u., 稳态初始无功为 0 p.u., 在 20 s 时电网电压跌落至 0.4 p.u., 持续时间为 0.5 s, 分别对饱和参数模型与不饱和参数模型进行仿真。不饱和电抗参数模型参数设置如表 1 所示。调相机电抗饱和参数设置如表 2 所示, 仿真结果对比如图 5 所示。

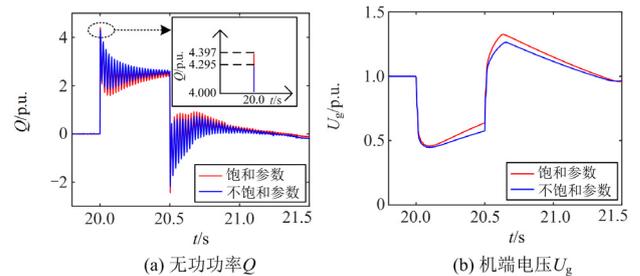


图 5 低电压故障下饱和与不饱和参数调相机暂态特性对比
Fig. 5 Comparison of transient characteristics of the synchronous condenser with saturation and unsaturated parameters under low voltage fault

根据严重低电压工况下是否考虑饱和的调相机时域仿真结果可知, 不考虑饱和影响时, 调相机最大暂态无功输出 Q_{max} 为 4.295 p.u.。考虑饱和时, 调相机最大暂态无功输出 Q_{max} 为 4.397 p.u., 考虑饱和情况为调相机最大暂态无功输出 Q_{max} 带来了约

2.375%的提升。从原理上分析：在故障工况下，由于电机定、转子磁路饱和引起的电磁暂态参数减小，会一定程度上增大调相机暂态过程中的无功输出。因此在上述仿真条件下，电磁参数减小会使调相机的最大无功输出增加。与 1.1 节的理论分析结果一致。

2) 初始无功一定，不同电压跌落程度

为分析严重低电压工况下，电压跌落程度对调相机暂态无功输出的影响，设置调相机初始无功为 0 p.u.，对调相机在电源电压突然跌落至 $U = 0.8$ p.u.、 $U = 0.6$ p.u.、 $U = 0.3$ p.u. 的暂态无功输出进行仿真，结果如图 6 所示。调相机参数同表 1。

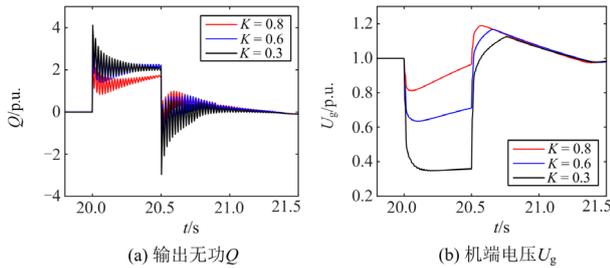


图 6 电压跌落程度对调相机暂态无功输出的影响

Fig. 6 Influence of voltage sag on transient reactive power output of the synchronous condenser

根据仿真结果可知，电压突然跌落时，调相机本身电磁暂态响应会向系统提供大量的无功，同时励磁系统进行强励，以增大调相机励磁电流，向系统持续提供无功。调相机直轴电流及励磁电流随电压跌落程度增大而增大。调相机向系统提供的暂态无功随电压跌落程度加深而呈现先增大后减小的规律，这主要是由于调相机输出无功还受电压的影响。在一般故障情况下，调相机机端电压普遍在 0.8 p.u. 以上。因此，调相机在一般工况下的无功出力随着电压跌落程度增大而增加。仿真结果与理论分析结果一致。

3) 电压跌落至 0.4 p.u.，不同初始无功

为分析调相机稳态初始无功对其暂态无功输出特性的影响，设置电源电压在 20 s 时跌落至 0.4 p.u.，仿真分析调相机在初始无功为 0 p.u.、-0.3 p.u.、0.6 p.u. 条件下的暂态无功输出，调相机的无功峰值与无功增量如表 3 所示。

表 3 低电压故障下调相机无功峰值与无功增量

Table 3 Reactive power peak and increment of the synchronous condenser under low-voltage fault

初始无功/p.u.	暂态无功输出峰值/p.u.	暂态无功最大增量/p.u.
-0.3	4.144	4.444
0	4.397	4.397
0.6	4.713	4.113

可以看出，调相机稳态初始无功会影响调相机的无功输出能力，随着调相机初始无功的增加，调相机暂态无功输出增加，暂态无功增量减小。仿真结果与理论分析结果一致。

1.3 过电压故障下调相机暂态无功特性仿真分析

1) 初始无功一定，电压暂升至 1.3 p.u.

严重过电压工况下，调相机定转子磁路饱和会使其电磁暂态参数发生变化，进而影响其暂态无功输出特性。此外，故障工况下的电压暂升程度、调相机稳态运行时的初始无功也会对其暂态无功输出特性产生影响。设置初始电源电压 $U_N = 1$ p.u.，稳态初始无功为 0 p.u.，在 20 s 时电网电压暂升至 1.3 p.u.，持续时间为 0.5 s，分别对饱和参数模型与不饱和参数模型进行仿真。不饱和电抗参数模型参数设置如表 1 所示。调相机饱和参数设置如表 4 所示，仿真结果对比如图 7 所示。

表 4 调相机饱和参数设置

Table 4 Saturated parameter settings of the synchronous condenser

电抗参数	饱和值	电抗参数	饱和值
直轴同步电抗 $X_d/p.u.$	1.133	交轴同步电抗 $X_q/p.u.$	1.14
直轴暂态电抗 $X'_d/p.u.$	0.127	交轴暂态电抗 $X'_q/p.u.$	1.14
直轴次暂态电抗 $X''_d/p.u.$	0.096	交轴次暂态电抗 $X''_q/p.u.$	0.112

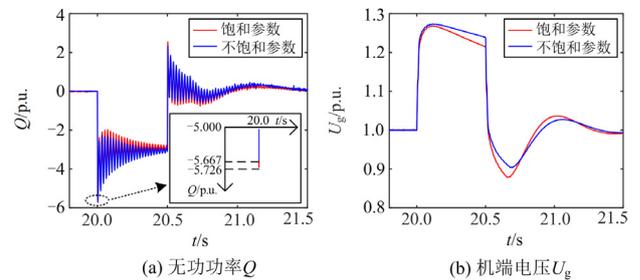


图 7 过电压故障下饱和与不饱和参数调相机暂态特性对比

Fig. 7 Comparison of transient characteristic of the synchronous condenser between saturated and unsaturated parameter under over-voltage fault

根据严重过电压工况下是否考虑饱和的调相机时域仿真结果可知，不考虑饱和影响时，调相机最大暂态进相无功 Q_{max} 为 -5.667 p.u.。考虑饱和时，调相机最大暂态进相无功 Q_{max} 为 -5.726 p.u.，考虑饱和情况为调相机最大暂态进相无功 Q_{max} 带来了约 1.04% 的提升。从原理上分析：调相机由于磁路饱和导致的电磁暂态参数变化，可以增大调相机的暂态进相能力，在上述仿真条件下，电磁参数减小会使调相机的进相无功增加。

2) 初始无功一定, 不同电压暂升程度

为了分析电压骤升程度对调相机暂态进相能力的影响, 设置调相机初始无功为 0 p.u., 仿真得到电源电压在骤升至 $U=1.1$ p.u.、 $U=1.2$ p.u.、 $U=1.3$ p.u. 情况下调相机暂态进相运行结果如图 8 所示。调相机参数采用表 1 参数。

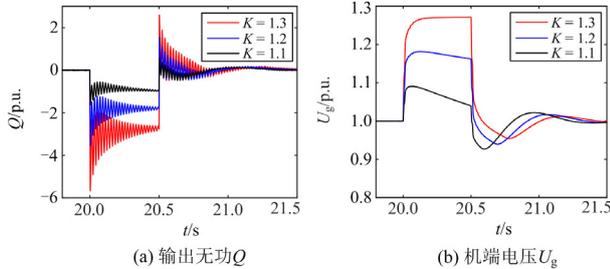


图 8 电压暂升程度对调相机暂态无功输出的影响

Fig. 8 Influence of voltage swell on transient reactive power output of the synchronous condenser

根据仿真结果可知, 电压骤升时, 调相机由于电机本身的电磁暂态响应, 会迅速从系统中吸收多余的无功, 此时励磁系统处于低励状态, 励磁电流随着电压抬升程度增大而增大, 调相机暂态进相无功最大值随电压骤升程度增大而增大。仿真结果与理论分析结果一致。

3) 电压暂升至 1.3 p.u., 不同初始无功

为分析调相机稳态初始无功对其暂态进相能力的影响, 设置电源电压在 20 s 时骤升至 1.3 p.u., 仿真分析调相机在初始无功为 0 p.u.、-0.4 p.u.、0.8 p.u. 条件下的暂态进相无功输出, 调相机的无功峰值与无功增量如表 5 所示。调相机参数同表 1。

表 5 过电压故障下调相机无功峰值与无功增量

Table 5 Reactive power peak and increment of the synchronous condenser under over-voltage fault

初始无功/p.u.	暂态无功输出峰值/p.u.	暂态无功最大增量/p.u.
-0.4	-6.031	-5.731
0	-5.667	-5.667
0.8	-4.887	-5.487

可以看出, 调相机稳态初始无功会影响调相机的暂态进相能力, 随着调相机初始无功的减小, 调相机的暂态进相无功峰值增加, 暂态进相无功增量也增加。仿真结果与理论分析结果一致。

2 调相机励磁控制优化

2.1 励磁控制需求分析

首先对调相机的励磁控制需求进行分析。图 9 为电压暂升故障时的机端电压, 结合 1.3 节对调相

机暂态无功特性的分析可以看出, 调相机能够支撑 HVDC 系统的电压。但在故障恢复后调相机发出的冗余无功会造成暂态过电压, 影响系统电压稳定。

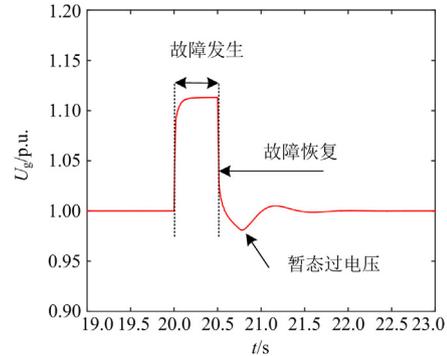


图 9 电压暂升时的机端电压

Fig. 9 Terminal voltage when voltage rises temporarily

因此, 根据受端电网发生电压故障时的电网电压特性, 调相机励磁控制策略的主要目标如下:

- 1) 快速输出无功, 减小电网的电压暂升、抑制跌落故障后的受端电网电压波动, 防止严重低电压引起的后续换相失败导致的电网电压失稳;
- 2) 抑制故障后冗余无功导致的暂态过电压;
- 3) 减少后续的电网电压波动。

2.2 直流输电工程无功控制模型

根据实际工程参数, 在 Simulink 中建立锡盟-泰州±800 kV 特高压直流输电工程的无功控制模型, 下面对直流工程进行介绍。

1) 受端交流电网等值

泰州换流站分为 500 kV 和 1000 kV 两级交流系统, 两级交流网独立配置交流滤波器, 站控系统配置独立的无功控制, 分别对应控制 500 kV 和 1000 kV 的交流滤波器, 这两个无功控制功能配置完全相同, 控制参数相互独立, 因此, 本文受端换流站接入 500 kV 交流系统与相应无功控制。

锡盟换流站取交流电压基准值为 530 kV, 泰州换流站取交流电压基准值为 520 kV, 基准容量为 60 000 MVA; 基准频率为 50 Hz。将电网的电路等值, 送端为 $R_{eq} = 10.508 \angle 83.6^\circ \Omega$, 受端为 $R_{eq-500} = 8.6347 \angle 83.6^\circ \Omega$ 。

2) 受端交流电网无功控制策略

首先, 分析换流站交流滤波器与并联电容器的配置情况, 以锡盟站为例: 锡盟站共配置 4 大组、20 小组交流滤波器/并联电容器; 每一大组所包含的小组交流滤波器和并联电容器的类型及数量如表 6 和表 7 所示, 即第 1 大组包含额定容量为 245 Mvar 的 12/24、24/36、3 次交流滤波器各 1 组、额定容

量为 365 Mvar 的电容器 2 组, 交流滤波器和并联电容器的额定电压均为 530 kV。

表 6 锡盟换流站交流滤波器组

Table 6 AC filter bank of Ximeng converter station

ACF	BP 12/24	HP 24/36	HP3	并联电容器
额定电压/kV	530	530	530	530
额定容量/Mvar	245	245	245	365
1	1	1	1	2
2	1	1	1	2
3	1	1	0	3
4	1	1	0	3

表 7 泰州换流站交流滤波器组

Table 7 AC filter bank of Taizhou converter station

ACF	BP 12/24	HP3	并联电容器
额定电压/kV	520	520	520
额定容量/Mvar	245	245	210
1	3	1	1
2	3	0	2
3	2	0	2

根据锡盟-泰州±800 kV 特高压直流输电系统的交流滤波器无功控制策略, 在 Simulink 中建立无功控制模型。图 10 所示为锡盟换流站和泰州换流站的无功控制策略。

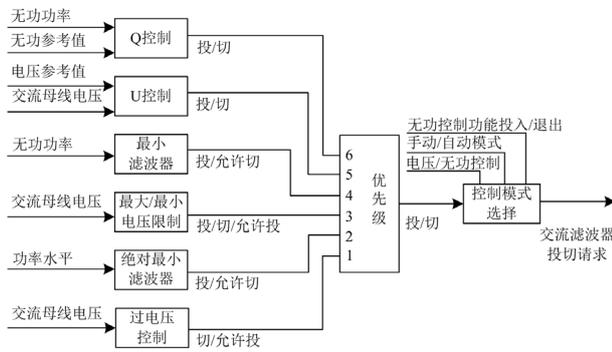


图 10 锡盟换流站和泰州换流站的无功控制策略

Fig. 10 Reactive power control strategy of Ximeng converter station and Taizhou converter station

锡盟换流站和泰州换流站的无功控制具有以下功能, 并按以下优先级决定滤波器的投切。

1) 过电压控制: 快速切除滤波器以降低稳态过电压。当母线电压分别大于 1.3 p.u.、1.2 p.u.、1.3 p.u. 时, 每隔 250 ms、1 s、8 s 的延迟时间切除一大组交流滤波器。如果依旧出现过电压, 则经过延迟时间切除到最小功率下的绝对最小滤波器。

2) 绝对最小滤波器限制: 为了防止滤波设备过负荷所需投入的绝对最小滤波器组数。任何情况下, 该条件必须满足。

3) 最大/最小电压限制: 交流母线需避免过电压引起保护动作。详细定值如表 8 所示。

4) 最小滤波器限制: 为满足滤除谐波的要求需投入的最小滤波器组。详细设置如表 9 所示。

5) Q 控制/U 控制: 无功交换控制/电压控制(可切换), 控制换流站和交流系统的无功交换量为设定参考值/控制换流站交流母线电压为设定参考值。需要选择当前运行在 U 控制或 Q 控制, 本文选择 Q 控制, 并在正常运行时, 该条件必须满足。

表 8 锡盟换流站和泰州换流站投/切定值

Table 8 Switch/cut value of Ximeng converter station and Taizhou converter station

	锡盟换流站/kV	泰州换流站/kV
要求分组切除的最大电压(必切)	550	550
限制分组投入的最大电压(禁投)	542	530
限制分组切除的最小电压(禁切)	510	510
要求分组投入的最小电压(必投)	500	500

表 9 最小滤波器配置

Table 9 Minimum filter configuration

ACF	HP 12/24	HP3	单极全压/Mvar	单极降压/Mvar
1	1	0	638	638
2	2	0	1275	1275
3	2	1	1913	1530
4	3	1	2703	2040

2.3 基于饱和参数的励磁控制策略优化

调相机动态特性研究时采用同步发电机模型, 故障点之外的系统可用一个等值系统代替^[20], 网络结构示意图如图 11 所示。



图 11 调相机网络结构示意图

Fig. 11 Schematic diagram of network structure of the synchronous condenser

图中: X_k 为升压变压器的短路电抗; X_{f1} 为升压变压器与故障发生点的电气距离; X_{f2} 为电网与故障发生点的电气距离。

在分析调相机对电压恢复的具体影响中, 将电压作为已知变量, 采用调相机输出的无功功率来研究调相机的暂态无功特性。将调相机的无功特性分为次暂态特性与暂态特性两个阶段。在次暂态特性分析中, 由于次暂态过程短暂, 采用发电机完全模型进行分析; 在暂态特性分析中忽略阻尼绕组及定子绕组的影响。因此, 调相机给系统提供的无功为

$$Q = U_q i_d - U_d i_q \quad (10)$$

按照发电机惯例，忽略定子绕组电阻，调相机运行相量关系如图 12 所示。图中： U 为升压变压器的高压侧电压； E_Q 为 q 轴虚拟电动势。

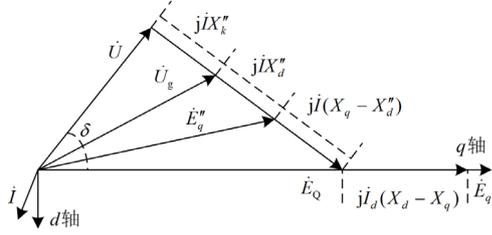


图 12 调相机运行相量图

Fig. 12 Operation phasor diagram of the synchronous condenser

在正常运行时，调相机的有功功率通常小于 1.4%，在故障期间也基本不变，即 $\delta \approx 0$ 。根据 $U_d = U \sin \delta$ ， $U_q = U \cos \delta$ 可知， $U_d \approx 0$ ， $U_q \approx U$ 。因此，调相机给系统输入的无功为

$$Q \approx U_q i_d \approx U i_d \quad (11)$$

故障时调相机的无功增量为

$$\begin{aligned} \Delta Q &= Q - Q_0 = U i_d - U_0 i_{d0} \approx \\ & (U_0 + \Delta U)(i_{d0} + \Delta i_d) - U_0 i_{d0} = \\ & U \Delta i_d + \Delta U i_{d0} \end{aligned} \quad (12)$$

电压变化量 ΔU 及故障后电压 U 与系统容量、系统电网强度及故障类型有关，与调相机的暂稳态电抗参数没有直接的关系；直流电流增量 Δi_d 与调相机暂稳态电抗参数有关，直流电流初始值 i_{d0} 与调相机的初始运行工况有关。由式(12)可知，故障时调相机给系统输出的无功也可以表示为

$$\Delta Q = -U \Delta U / (X_d'' + X_k) + \Delta U i_{d0} \quad (13)$$

由式(13)可知，暂态工况下调相机输出的无功主要与 X_d'' 和 X_k 有关， X_d'' 和 X_k 越小，调相机瞬时输出的无功越大。 ΔQ 与 $-\Delta U$ 呈正相关，即电压跌落(ΔU 为负)时调相机给系统输出无功，式中的第二项表示 ΔQ 与 $\Delta U i_{d0}$ 呈正相关，而电压跌落时 ΔU 为负，因此 i_{d0} 越小(进相运行时 i_{d0} 为负)，调相机瞬时输出的无功越大。以此为基础提出励磁控制优化策略，如图 13 所示。

从第 1 节对调相机暂态无功特性仿真结果中可以看出，故障后受饱和和暂稳态电抗参数影响，调相机暂态无功输出峰值增大。故障后第一个周期，调相机无功输出最大，后面暂态过程中无功逐渐减小。这会导致故障第一个周期后，无功输出减小，电网

无功支撑不够，电压继续下降/上升。故障结束后的恢复期间，调相机提供冗余无功，引起暂态过电压。

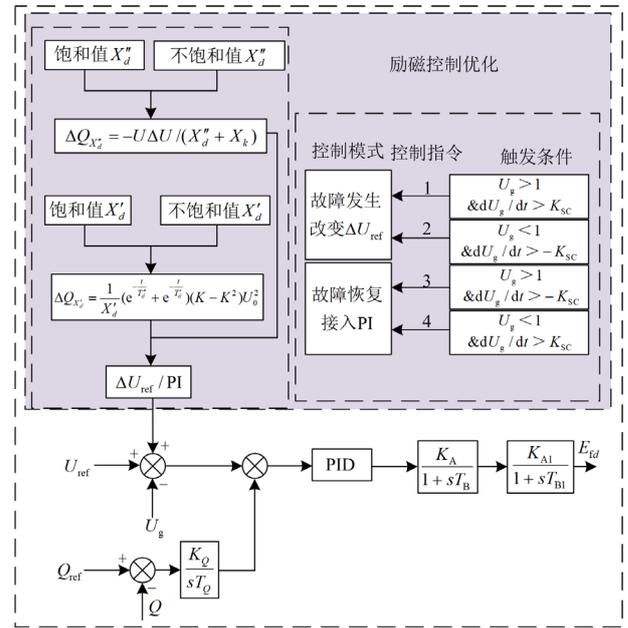


图 13 考虑饱和参数的励磁控制优化策略

Fig. 13 Optimization strategy of excitation control considering saturation parameter

因此，将次暂态电抗的无功增量通过式(13)引入励磁控制中，将暂态电抗的无功增量通过式(8)引入励磁控制中。虽然在调相机暂态无功输出的理论分析中也推导了次暂态电抗的无功增量表达式，但式(13)更清晰，适合控制应用，所以采用式(13)进行次暂态电抗的无功增量计算。

在暂态励磁控制中，分别引入次暂态和暂态电抗的饱和参数与不饱和参数来计算增量无功，将增量无功 $\Delta Q_{X_d''}$ 与 $\Delta Q_{X_d'}$ 作为励磁环节中的参考电压 ΔU_{ref} 来增大电压实际值 U_g 与参考电压值 U_{ref} 之间的差值，达到增发无功的效果。在故障恢复过程，调相机继续发出无功功率，导致电网存在冗余无功，引起暂态过电压。而在励磁控制中引起暂态过电压的原因为无功外环的慢速调节。因此在故障恢复阶段，分别由饱和参数 X_d'' 与 X_d' 得到的 $\Delta Q_{X_d''}^1$ 与 $\Delta Q_{X_d'}^1$ ($\Delta Q_{X_d''}^1$ 与 $\Delta Q_{X_d'}^1$ 为饱和参数的无功增量)经过 PI 控制反向接入励磁控制中，减小无功外环慢速调节导致的冗余无功，以此来抑制暂态过电压。具体的励磁控制流程如图 14 所示。

1) 当故障检测模块满足 $U_g > 1$ 且 $dU_g / dt > K_{SC}$ 或 $U_g < 1$ 且 $dU_g / dt > -K_{SC}$ 时(K_{SC} 为电压变化

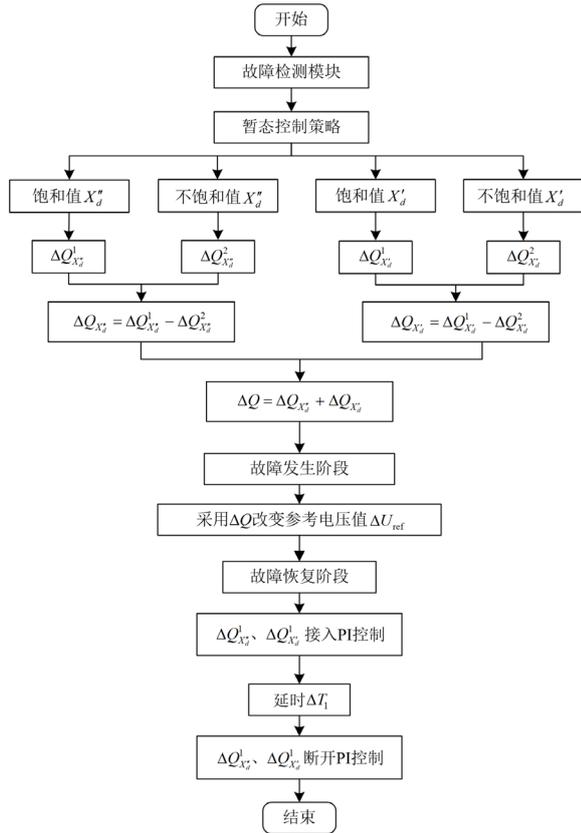


图 14 励磁控制优化策略流程图

Fig. 14 Flow chart of excitation control optimization strategy

斜率门槛值, 设 $K_{SC} = 10$), 表示检测到交流系统发生电压暂升/跌落故障, 满足故障发生控制模式的触发条件, 利用式(8)及式(13)中无功与参数间的数学关系, 由表 2 及表 4 得到不同电网故障工况下饱和的直轴次暂态电抗 X_d'' 及直轴暂态电抗 X_d' 。结合不饱和的恒定 X_d'' 及 X_d' , 得到调相机磁饱和情况下可以增发的无功功率 $\Delta Q (\Delta Q = \Delta Q_{X_d} + \Delta Q_{X_q})$, 利用饱和参数增发的无功功率 ΔQ 调整参考电压 U_{ref} 。

2) 当故障检测模块满足 $U_g > 1$ 且 $dU_g/dt > -K_{SC}$ 或 $U_g < 1$ 且 $dU_g/dt > K_{SC}$ 时 (K_{SC} 为电压变化斜率门槛值, 设为 $K_{SC} = 10$), 表示检测到交流系统处于电压暂升/跌落故障后的恢复时期, 满足故障恢复控制模式的触发条件, 将基于饱和参数 X_d'' 与 X_d' 得到的 $\Delta Q_{X_d}^1$ 与 $\Delta Q_{X_d}^2$ ($\Delta Q_{X_d}^1$ 与 $\Delta Q_{X_d}^2$ 为饱和和参数的无功增量) 经过 PI 控制反向接入励磁控制中, 减小调相机发出的冗余无功功率导致的暂态过电压。但持续接入反向的 $\Delta Q_{X_d}^1$ 与 $\Delta Q_{X_d}^2$ 会导致调相机初始无功改变, 因此经过延迟时间 ΔT_1 ($\Delta T_1 = 1.5$ s) 断开 $\Delta Q_{X_d}^1$ 与 $\Delta Q_{X_d}^2$ 。

3 励磁控制优化策略仿真验证

3.1 受端交流系统低电压下励磁控制仿真分析

基于 Simulink 仿真平台, 建立与实际锡盟-泰州特高压直流工程无功控制一致的仿真模型。调相机的不饱和参数采用表 1 中参数进行仿真验证。饱和参数如表 2 所示。设置系统发生电网电压跌落, 电压跌落至 0.4 p.u., 发生时刻为仿真过程第 6 s, 持续时间为 0.5 s, 并与未优化的常规励磁控制进行对比, 如图 15 所示。表 10 为优化励磁控制与常规励磁控制的电压跌落最小值点, 以及故障恢复过程中在额定电压附近上下波动最大值点。

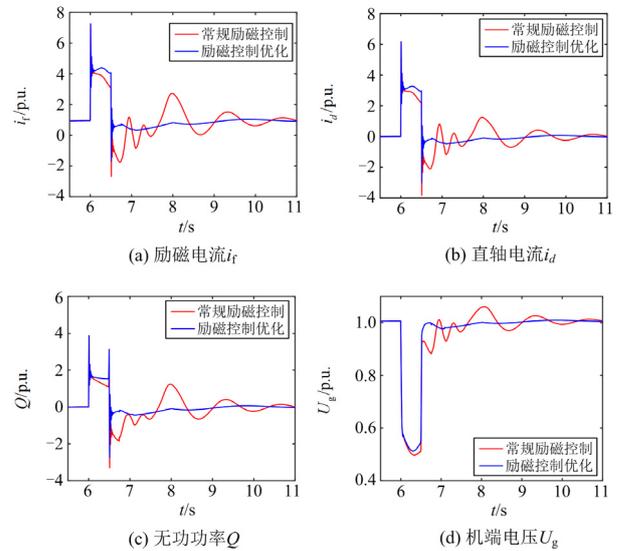


图 15 低电压下常规与优化励磁控制调相机暂态特性对比

Fig. 15 Comparison of the transient characteristics of the synchronous condenser with conventional and optimized excitation control under low-voltage fault

表 10 低电压故障下常规与优化励磁控制机端电压
Table 10 Terminal voltage for conventional and optimized excitation control under low-voltage falut

机端电压	常规励磁控制	励磁控制优化
故障期间电压跌落最小值/p.u.	0.497	0.513
故障恢复后暂态电压最大值/p.u.	1.061	1
故障恢复后暂态电压最小值/p.u.	0.883	0.977

由图 15(a)可知, 常规励磁控制在故障发生过程后期不能持续提供充足无功, 而在故障恢复后不能及时调整励磁, 持续励磁。因此, 如图 15(c)所示, 在故障发生阶段的后期, 调相机提供的无功功率为 1.095 p.u., 故障后恢复过程中无功功率最大点为 1.237 p.u., 最低点为 -1.795 p.u.。由调相机输出的冗余无功会导致机端电压的波动, 出现暂态过电压。

由图 15(d)可知, 机端电压跌落至 0.497 p.u., 故障后恢复过程中的暂态过电压最大值点为 1.061 p.u., 最小值点为 0.883 p.u.。

由图 15(c)可知, 励磁控制优化策略在故障发生阶段的后期提供的无功功率为 1.531 p.u., 故障后恢复过程中无功功率最大值点为 -0.166 p.u., 最小值点为 -0.442 p.u.。由图 15(d)可知, 励磁控制优化策略的机端电压跌落至 0.513 p.u., 故障后恢复过程中的暂态过电压最大值点为 1 p.u., 最小值点为 0.977 p.u.。结果表明: 电压跌落时, 相比未进行励磁控制策略优化的电压, 励磁优化后电压跌落率可减少 3.22%, 将暂态过电压抑制在 $\pm 2.3\%$ 额定电压范围内。

3.2 受端交流系统过电压下励磁控制仿真分析

基于 Simulink 建立与实际锡盟-泰州特高压直流工程无功控制一致的仿真模型。调相机不饱和参数采用表 1 中参数, 饱和参数如表 4 所示。设置系统发生电网电压暂升, 电压暂升至 1.3 p.u., 发生时刻为仿真过程第 6 s, 持续时间为 0.5 s, 并与未优化的常规励磁控制进行对比, 如图 16 所示。表 11 为优化励磁控制与常规励磁控制的电压暂升最大值点, 以及故障恢复过程中在额定电压附近上下波动最大值点。

由图 16(a)可知, 常规励磁控制在故障发生过程后期不能持续提供充足无功, 而在故障恢复后不能及时调整励磁, 持续励磁。因此, 如图 16(c)所示, 在故障发生阶段的后期, 无功功率为 -1.729 p.u., 故

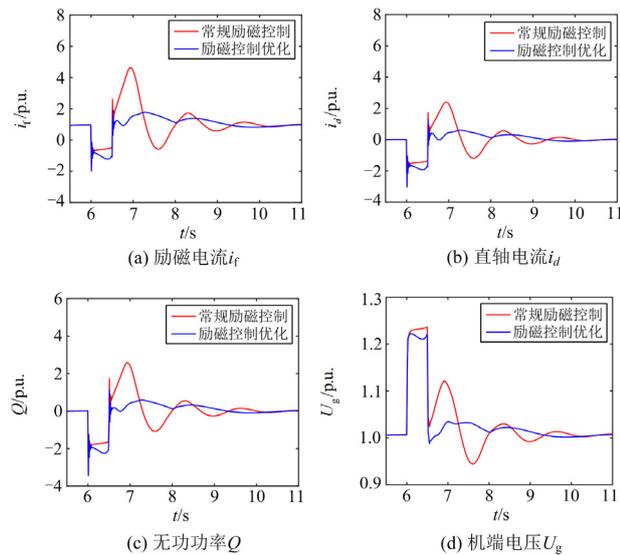


图 16 过电压故障下常规与优化励磁控制调相机暂态特性对比
Fig. 16 Comparison of the transient characteristics of the synchronous condenser with conventional and optimized excitation control under over-voltage fault

表 11 过电压故障下常规与优化励磁控制机端电压
Table 11 Terminal voltage for conventional and optimized excitation control under over-voltage fault

机端电压	常规励磁控制	励磁控制优化
故障期间电压暂升最大值/p.u.	1.236	1.222
故障恢复后暂态电压最大值/p.u.	1.121	1.035
故障恢复后暂态电压最小值/p.u.	0.944	0.99

障后恢复过程中无功功率最大值点为 2.574 p.u., 最小值点为 -1.08 p.u.。由调相机输出的冗余无功会导致机端电压的波动, 出现暂态过电压。由图 16(d)可知, 常规励磁控制策略的机端电压上升至 1.236 p.u., 故障后恢复过程中的暂态过电压最大值点为 1.121 p.u., 最小值点为 0.944 p.u.。

由图 16(c)可知, 在故障发生阶段的后期, 励磁控制优化策略的无功功率为 -2.251 p.u., 故障后恢复过程中无功功率最大值点为 0.588 p.u., 最小值点为 -0.004 p.u.。由图 16(d)可知, 励磁控制优化策略的机端电压上升至 1.222 p.u., 故障后恢复过程中的暂态过电压最大值点为 1.034 p.u., 最小值点为 0.99 p.u.。结果表明: 电压暂升时, 相比未优化励磁控制策略的电压, 励磁控制策略优化后电压上升率可减少 1.1%, 将暂态过电压抑制在 $\pm 3.5\%$ 额定电压范围内。

4 讨论

国内外文献针对调相机励磁控制提出了多种新方法, 从双闭环-多环控制^[8-11]、前馈附加 PI 控制^[12]及协调控制^[13-20]等方面优化励磁控制策略。综合来看, 主要是采用控制理论和智能算法对励磁控制策略中的 PID 参数或者引入协调控制进行优化。以上方法可以一定程度地提高调相机的响应速度及无功输出能力, 提高调相机对电网电压的支撑能力。但是, PID 控制效果受其具体参数设置影响且依赖调相机本体电磁参数的准确性, 而协调控制多侧重于稳态工况下调相机与换流站的协调, 在故障暂态期间其电压支撑能力并不理想。同时上述方法均未考虑调相机电机本体在暂态饱和情况下电磁参数不同于稳态不饱和情况的问题。

针对以上方法在故障期间未能充分发挥调相机暂态无功能力, 难以准确有效地支撑电网电压故障的问题, 本文提出考虑调相机暂态饱和参数的分阶段励磁控制策略, 在满足常规状态下调相机励磁控制的基础上, 可以在暂态饱和和工况下更充分地发挥调相机暂态无功和电网电压的支撑能力。但是, 本文所提方法需要进行调相机本体电磁有限元仿真, 获取饱和状态下电机电磁参数。

5 结论

针对常规励磁控制在故障期间未能充分发挥其暂态无功能力, 难以准确有效地支撑电网电压故障的问题, 提出考虑饱和参数的分阶段励磁控制优化策略。首先, 推导调相机暂态无功输出表达式, 分析不同运行工况下饱和参数对暂态无功特性的影响。其次, 基于调相机参数与输出无功的数学关系引入考虑饱和参数的无功增量, 分阶段优化励磁环节中内环电压参考值与外环 PI 控制。最后, 建立锡盟-泰州特高压直流输电系统的无功控制模型, 通过仿真验证励磁控制策略优化效果。所得主要结论如下:

1) 基于调相机暂态无功输出表达式与时域仿真, 分析了调相机饱和参数对调相机暂态无功输出能力的影响。结果表明: 考虑饱和情况为调相机最大暂态无功输出 Q_{\max} 带来了约 1.7% 的提升。

2) 基于调相机暂态无功输出表达式与时域仿真, 分析了调相机不同电压变化程度及不同初始无功对调相机暂态无功输出能力的影响。结果表明: 电网电压跌落时, 调相机暂态无功增量随电压变化程度的增大, 先增大后减小; 随着调相机初始无功的增加, 调相机暂态无功输出增加, 暂态无功增量减小。电网电压骤升时, 调相机暂态无功进相增量随电压骤升程度的增大而增大; 随着调相机初始无功的减小, 调相机的暂态进相无功峰值增加, 暂态进相无功增量也增加。

3) 考虑饱和参数的分阶段励磁控制优化策略, 仿真分析了不同电网电压故障时的励磁控制优化策略效果。结果表明: 励磁控制优化策略可将电压变化率减少约 $\pm 2\%$, 可将暂态过电压抑制在 $\pm 3\%$ 额定电压范围内。

参考文献

- [1] 王英, 王亚兰, 陈小强, 等. 一种适用于 HVDC 带双无源谐波注入的串联型 36 脉波整流器[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(18): 165-176.
WANG Ying, WANG Yalan, CHEN Xiaoqiang, et al. A series-connected 36-pulse rectifier for HVDC with a dual passive harmonic injection method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(18): 165-176.
- [2] 王璐, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 考虑直流电流变化的 HVDC 系统不对称故障换相失败分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 17-23.
WANG Lu, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Analysis of asymmetric fault commutation failure in an HVDC system with DC current variation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 17-23.
- [3] THIO C V, DAVIES J B, KENT K L. Commutation failures in HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 946-957.
- [4] MIRSAEIDI S, DONG Xinzhou, TZELEPIS D, et al. A predictive control strategy for mitigation of commutation failure in LCC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 160-172.
- [5] GUO Chunyi, LIU Yuchao, ZHAO Chengyong, et al. Power component fault detection method and improved current order limiter control for commutation failure mitigation in HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1585-1593.
- [6] 杨硕, 郭春义, 王庆, 等. 分层接入特高压直流输电系统协调控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4356-4363.
YANG Shuo, GUO Chunyi, WANG Qing, et al. Coordinated control approach for UHVDC system under hierarchical connection mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4356-4363.
- [7] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [8] 刘席洋, 王增平, 郑博文, 等. LCC-HVDC 故障恢复型连续换相失败机理分析与抑制措施[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3163-3172.
LIU Xiyang, WANG Zengping, ZHENG Bowen, et al. Mechanism analysis and mitigation measures for continuous commutation failure during the restoration of LCC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3163-3172.
- [9] 许婷苇, 张海强, 林圣, 等. 基于特征谐波电流积分比值的 HVDC 整流站保护优化方案[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 126-134.
XU Tingwei, ZHANG Haiqiang, LIN Sheng, et al. A novel optimization scheme for HVDC rectifier station protection based on an integral ratio of characteristic harmonic current[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 126-134.
- [10] 石祥建, 牟伟, 韩焦, 等. 大型同步调相机控制策略研究[J]. 中国电力, 2017, 50(12): 44-50.
SHI Xiangjian, MOU Wei, HAN Jiao, et al. Research on control strategy of large synchronous condenser[J].

- Electric Power, 2017, 50(12): 44-50.
- [11] 吴跨宇, 房乐, 卢岑岑, 等. 大型调相机励磁与无功电压协调控制策略探讨[J]. 浙江电力, 2018, 37(2): 36-41.
WU Kuayu, FANG Le, LU Cencen, et al. Discussion on coordinated control strategy for large synchronous compensator and reactive power[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(2): 36-41.
- [12] 党睿. 经同步调相机补偿的 HVDC 电压稳定控制策略研究[J]. 电工电气, 2018(7): 16-21.
DANG Rui. Research on high voltage direct current voltage stability control strategy compensated by synchronous compensator[J]. Electrotechnics Electric, 2018(7): 16-21.
- [13] FU M, CUI C, WANG L, et al. Influence of excitation parameters on the dynamic characteristics of the distributed synchronous condenser[C] // 2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA), July 1-3, 2021, Wuhan, China: 1-6.
- [14] 赫英明. 弱送端 HVDC 系统中同步调相机的性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
HE Yingming. Analysis of performance of synchronous condenser in HVDC with weak system at sending end[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2019.
- [15] 巩伟峥, 肖洋, 夏潮, 等. 华东电网调相机 AVC 控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3106-3113.
GONG Weizheng, XIAO Yang, XIA Chao, et al. Study on AVC control strategy of synchronous condenser in East China Grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3106-3113.
- [16] DAI F, TAN F, JIANG M, et al. Characteristic analysis and parameter optimization of synchronous condensers[C] // 2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), September 20-23, 2020, Nanjing, China: 1-5.
- [17] 刘增训, 李晓飞, 刘建琴. 含调相机的高压直流送端换流站无功协调控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3857-3865.
LIU Zengxun, LI Xiaofei, LIU Jianqin. HVDC converter station reactive power coordinated control strategy with synchronous condenser[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3857-3865.
- [18] RAO B S, GOUDA P K, RAO S S, et al. Reactive power control in hybrid system using fuzzy logic control[C] // 2022 International Conference on Intelligent Controller and Computing for Smart Power (ICICCSPP), July 21-23, 2022, Nanjing, China: 1-6.
- [19] 李锴, 邵德军, 徐友平, 等. 基于新一代调相机的多目标无功电压协调控制系统研究[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2961-2967.
LI Kai, SHAO Dejun, XU Youping, et al. Research on coordinated multi-objective reactive voltage control system based on new type synchronous condenser[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2961-2967.
- [20] 岳涵, 邵广惠, 夏德明, 等. 考虑过电压抑制的特高压直流弱送端系统无功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 172-179.
YUE Han, SHAO Guanghui, XIA Deming, et al. Reactive power control strategy for UHVDC weak sending-end system considering overvoltage suppression[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 172-179.
- [21] LI Jianfu, LI Hui, XIAO Wang, et al. Assessment on transient reactive power capability of a grid-connected synchronous condenser[C] // 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), August 11-14, 2019, Harbin, China: 1-7.
- [22] XIANG W, LIN W X, XU L, et al. Enhanced independent pole control of hybrid MMC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 861-872.
- [23] 李琦, 宋强, 刘文华, 等. 基于柔性直流输电的风电场并网故障穿越协调控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1739-1745.
LI Qi, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. A coordinated control strategy for fault ride-through of wind farm integration based on VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1739-1745.
- [24] 何炎, 李周, 李亚州, 等. 基于真双极接线的 VSC-MTDC 系统功率转代策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 95-101.
HE Yan, LI Zhou, LI Yazhou, et al. Power conversion strategy of VSC-MTDC system based on real bipolar wiring mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 95-101.

收稿日期: 2022-11-01; 修回日期: 2022-12-31

作者简介:

袁彬(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为调相机优化设计与控制, 新能源发电技术; E-mail: cqubingo@163.com

李辉(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为大功率电力电子器件应用与可靠性评估, 风力发电技术和高速电机控制; E-mail: cqulh@163.com

向学位(1993—), 男, 通信作者, 博士, 助理研究员, 研究方向为新能源发电技术, 特种电机设计与控制。E-mail: xueweixiang@cqu.edu.cn

(编辑 魏小丽)