

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.06.020

HVDC 系统中调相机与逆变侧关断角协调控制

王琳¹,王宏华¹,路天航¹,王成亮²

(1. 河海大学能源与电气学院,江苏 南京 211100; 2. 江苏方天电力技术有限公司,江苏 南京 211102)

摘要:为有效抑制故障消除后引起的 HVDC 受端系统过电压,提出了一种调相机与逆变侧关断角协调控制的策略,在逆变侧关断角固定的常规控制系统中加入无功调节器(QPC),通过调节逆变侧关断角实现对换流站的无功控制,同时协调整定调相机无功调节器和直流控制系统无功调节器的参数。基于 PSCAD/EMTDC 搭建含调相机的 HVDC 系统数值仿真模型,仿真结果表明,提出的调相机与逆变侧关断角协调控制策略可有效降低故障后 HVDC 受端系统过电压,加快交流系统电压的恢复时间。

关键词:高压直流输电系统;同步调相机;逆变侧;无功调节;协调控制

中图分类号:TM721 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2022)06-0152-07

Coordinated control of synchronous condenser and extinction angle of inverter side in HVDC system

WANG Lin¹, WANG Honghua¹, LU Tianhang¹, WANG Chengliang²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: To effectively suppress the overvoltage of HVDC receiving end system caused by the fault elimination, a coordinated control strategy of synchronous condenser and inverter side extinction angle is proposed. A reactive power regulator (QPC) is added to the conventional control system with a fixed extinction angle at the inverter side for realizing the reactive power control of the converter station by adjusting extinction angle at the inverter side, and at the same time coordinating the reactive power regulator parameters of both the synchronous condenser and the DC control system. The numerical simulation model of HVDC system with the synchronous condenser is built based on the PSCAD/EMTDC environment. The simulation results show that the coordinated control method can effectively reduce the overvoltage of HVDC receiving end system after the accident occurrence and speed up the recovery time of the AC system voltage.

Key words: high voltage direct current transmission system; synchronous condenser; inverter side; reactive power regulation; coordinated control

为实现碳达峰、碳中和,急需建设大规模的清洁能源发电系统^[1-2]和特高压直流输电工程,但特高压直流输电工程的快速建设,虽然带来了良好的经济效益^[3],同时也带来了受端动态无功补给不足和电压支撑能力减弱的问题。

调相机作为动态无功补偿装置具有较强无功支撑能力,在系统出现扰动或者故障时可以维持系统电压稳定^[4-6]。关于调相机与直流系统协调控制的研究:洪权等^[7]将滤波器组(电容器组)投切时的电压变化量作为调相机的无功控制修正量,从而降低了交流电压波动,减小了换相失败风险,同时利用调相机无功补偿减少电容器组投切次数,增加了电容器组的使用寿命。刘增训等^[8]通过调相机吸收无功来抑制送端换流站暂态过电压,利用交流滤波器对换流站无功适当过补,以此减少系统静态无功补偿容量的投入来抑制事故后稳态电压偏高。陈波等^[9]将交直流系统无功交换量和调相机剩余可调容量作为滤波电容器组的投切修正指令和调相机无功输出指令,减少了滤波电容器组的投入,增加了调相机的稳态初始无功出力。给调相机合

作者简介: 王琳(1986—),女,博士研究生,主要从事发电机励磁系统和电力系统稳定与运行控制研究。E-mail:lwang_hohai@163.com
通信作者: 王宏华(1963—),男,教授,博士,主要从事电力电子与运动控制系统等研究。E-mail:wanghonghua@263.net
引用本文: 王琳,王宏华,路天航,等. HVDC 系统中调相机与逆变侧关断角协调控制[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):152-158.
WANG Lin, WANG Honghua, LU Tianhang, et al. Coordinated control of synchronous condenser and extinction angle of inverter side in HVDC system [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(6):152-158.

理配置足够动态无功裕量及静态无功支持能力,可以抑制直流换流失败,避免滤波器投切造成的交流电压波动^[10-11]。上述研究集中在调相机与直流换流站中的电容器、滤波器等无功补偿设备之间的协调控制,并未涉及调相机与直流控制系统之间的协调控制。

关于通过直流控制系统调节无功输出的研究,涂仁川等^[12]对比分析了换流器无功调节器(QPC)和低负荷状态的无功优化(LLRPO),利用 QPC 或 LLRPO 辅助无功控制功能与低压电抗、STATCOM 进行无功平衡控制配合。采用降低直流电压参考值和增加触发角或关断角 2 种方式来增加换流站的无功消耗,用以解决直流低负荷运行时无功过剩问题^[13-14]。这些研究中利用直流控制系统辅助无功控制功能来增加换流器本身无功消耗,以此抑制送端电网过电压,没有考虑调相机参与 HVDC 系统的无功调节。

本文针对高压直流输电受端系统,以抑制故障后受端系统过电压为目标,通过分析逆变侧关断角、触发控制角及换相角对直流系统逆变站无功特性的影响,在逆变侧直流控制系统中引入 QPC,提出一种 HVDC 系统中调相机与逆变侧关断角协调控制策略,以期达到 HVDC 系统的最佳恢复和运行特性,提高受端电网的安全稳定水平。

1 直流控制对直流系统无功动态特性的影响

如图 1 所示,直流系统对交流系统的作用可以等效为换流母线处的时变注入电流或功率。图 1 中, U_s 为逆变侧交流母线电压 kV; U_{dn} 为直流系统额定电压, kV; I_{dn} 为直流系统额定电流, kA; P_{dn} 为直流系统有功功率, MW; Q_{dn} 为换流器(包括换流变)消耗的无功功率, MVar; Q_{cn} 为滤波器、电容等无功补偿装置的无功功率, MVar; Q_{sc} 为调相机发出的无功功率, MVar; Q_s 为直流系统从电网吸收的无功功率, MVar。

逆变站稳态运行时,如果不考虑交流和直流的谐波分量,可求出无功功率 Q_s ^[15]:

$$Q_s = Q_{dn} - Q_{cn} - Q_{sc} \tag{1}$$

其中

$$Q_{cn} = B_{cn} U_s^2 \quad Q_{dn} = P_{dn} \tan \varphi = P_{dn} \frac{\pi \theta / 180 - \sin \theta \cos (2 \gamma + \theta)}{\sin (2 \gamma + \theta) \sin \theta} \quad P_{dn} = U_{dn} I_{dn}$$
$$U_{dn} = N \left(\frac{3 \sqrt{2}}{\pi K_T} U_s \cos \gamma - \frac{3}{\pi} I_{dn} X_T \right) \quad \varphi = \arccos \left(\cos \gamma - \frac{I_{dn} X_T K_T}{\sqrt{2} U_s} \right) \quad X_T = U_k \frac{U_s / K_T^2}{S_n}$$

Q_{dn} 、 U_{dn} 、 P_{dn} 也可表示^[16-17]为

$$\begin{cases} Q_{dn} = N \frac{3 U_s^2}{4 \pi X_T K_T^2} \left[\frac{2 \pi \theta}{180} + \sin 2 \gamma - \sin (2 \gamma + 2 \theta) \right] \\ U_{dn} = N \frac{3 \sqrt{2}}{2 \pi K_T} U_s [\cos \gamma + \cos (\gamma + \theta)] = N \frac{3 \sqrt{2}}{\pi K_T} U_s \cos \frac{2 \gamma + \theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \\ P_{dn} = N \frac{3 U_s^2}{4 \pi X_T K_T^2} [\cos 2 \gamma - \cos (2 \gamma + 2 \theta)] \end{cases} \tag{2}$$

其中

$$\gamma = \arccos \left(\frac{\sqrt{2} I_{dn} X_T K_T}{U_s} + \cos \beta \right) = \beta - \theta$$

式中: K_T 为换流变压器变比; N 为 6 脉波换流桥的个数; X_T 为等效换相电抗, Ω ; B_{cn} 为滤波器、电容等无功补偿装置的等效电纳; φ 为换流站功率因数角, ($^\circ$); γ 为关断角, ($^\circ$); θ 为逆变侧触发控制角, ($^\circ$); θ 为换相角, ($^\circ$); U_k 为换流变压器短路阻抗, %; S_n 为换流变压器额定容量, MVA。

由式(1)和式(2)可知,逆变站吸收的无功和直流系统的无功动态响应与 U_s 、 I_{dn} 和 γ 有关。

计算的初始条件: $U_s = 230$ kV, $U_{dn} = 500$ kV, $I_{dn} = 2$ kA, $P_{dn} = 1\,000$ MW, $S_n = 519.8$ MVA, K_T 为 230/209.228, $U_k = 18\%$, 计算得到 $X_T = 13.315 \Omega$ 。

根据初始条件和式(2)可以计算出:初始运行点的触发超前角 $\beta_0 = 38.2^\circ$ ^[18], 初始运行点的关断角 $\gamma_0 =$

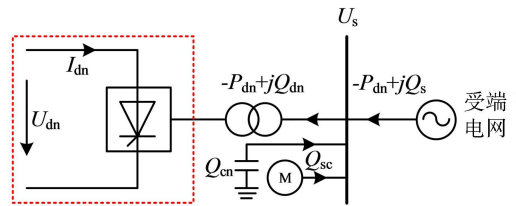


图 1 直流系统逆变站功率平衡示意图
Fig.1 Schematic diagram of power balance of HVDC system at inverter station

15°。由式(2)可知,当交流系统扰动或发生故障导致 U_s 下降时,为了保持 γ 不变,关断角固定常规控制将增大换流器的逆变侧触发控制角 β (图2)。逆变站交流母线电压初始运行值越高, β 越大, γ 就越大,发生换相失败的可能性越小。

由图3可知,当 U_s 不变时, Q_{dn} 随 γ 的增加而增加。当系统发生故障时,保持 γ 不变, β 会增加,换流器无功消耗也会增加,从而进一步降低了故障期间的换流母线电压。

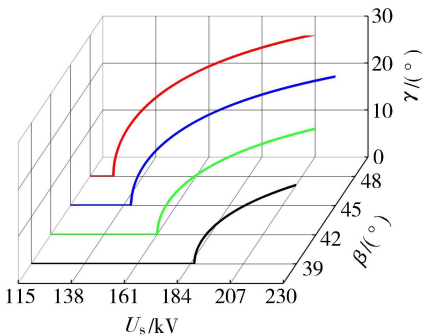


图2 γ 随 β 和 U_s 的变化
Fig.2 Variations of γ with β and U_s

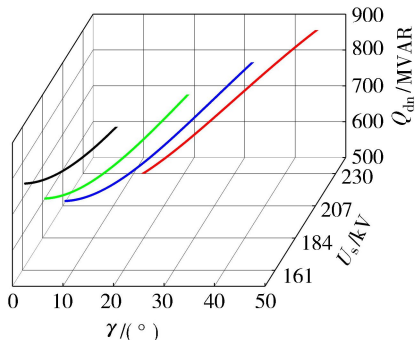


图3 Q_{dn} 随 γ 和 U_s 的变化
Fig.3 Variations of Q_{dn} with γ and U_s

2 调相机励磁控制参数整定

调相机励磁控制系统主要包括测量环节、励磁控制器、励磁机、限幅环节,如图4所示,其中, s 为复变量, U_{ref} 为逆变侧交流母线基准电压, U_t 为经过测量环节后的逆变侧交流母线电压, E_{max} 为调相机最高励磁电压, E_{min} 为调相机最低励磁电压, E_{fd} 为调相机励磁电压, T_R 为终端电压传感器的时间常数, T_c 、 T_b 分别为该控制器的超前时间常数和滞后时间常数, K_A 、 T_A 分别为比例系数和时间常数。将故障引起的逆变侧交流母线电压改变量作为调相机励磁控制系统的控制量,并根据调相机励磁控制系统稳定性来调整其励磁控制参数。测量环节对交流电压的测量过程进行模拟,励磁控制器采用串联校正。测量环节和励磁控制器的传递函数分别为

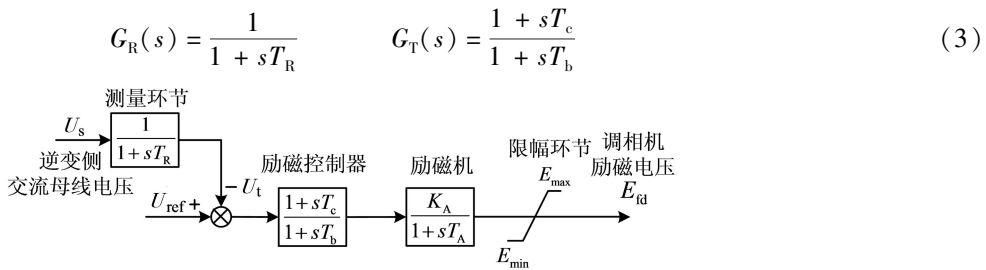


图4 调相机励磁控制系统
Fig.4 Exciter control system of synchronous condenser

对于图5所示串联校正励磁系统(ω_c 为剪切频率),根据频率响应特性来确定参数值,其指标范围值:增益裕度为10~20 dB;相位裕度为20°~80°。

励磁机的动态模型为

$$G_E(s) = \frac{K_A}{1 + sT_A}$$

(4)

如果不计电压测量环节的时间常数,此时的暂态增益 K_t 为^[19]

$$K_t = K_A \frac{T_c}{T_b}$$

(5)

ω_c 与 K_t 的关系为

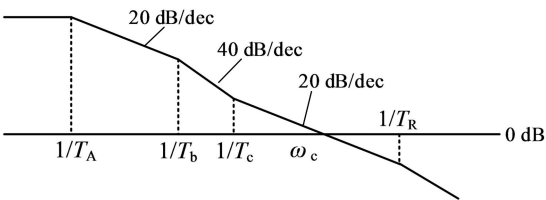


图5 串联校正励磁系统 bode 图
Fig.5 Bode diagram of series correction excitation system

$$\frac{K_t}{T_A} \approx \omega_c \quad (6)$$

根据式(6)求得 K_t 。

对于稳定的系统,幅频曲线必须以斜度 20 dB/dec 穿过 0 dB 线, T_c 按式(7)求得^[19]。

$$\frac{1}{T_c} \leq \frac{\omega_c}{n} (n \geq 2) \quad (7)$$

式中 n 为 ω_c 与 $1/T_c$ 之间的倍数。

由式(6)和式(7),可求得式(5)中 T_c 与 T_b 的比值。

3 逆变侧直流控制系统参数整定

通过对关断角固定的常规控制系统进行改进,将 U_s 的改变量作为 QPC 的控制量,将 QPC 的输出作为 QPC 控制关断角增量 $\Delta\gamma$,如图 6 所示。图 6 中 ΔI_{dn} 为逆变侧直流电流偏差量,逆变侧直流电流偏差控制是当逆变侧直流电流低于直流指令值时,将逆变侧直流电流偏差量 ΔI_{dn} 通过上升斜坡函数转变为逆变侧直流电流偏差控制关断角增量 $\Delta\gamma_i$; K_{qp} 、 K_{qi} 分别为待优化的比例、积分系数; K_{ip} 、 K_{ii} 分别为关断角控制器的比例和积分系数; K_{i1} 、 T_{i1} 分别为逆变侧换流站的比例系数和时间常数; K_{i2} 、 T_{i2} 分别为测量环节的比例系数和时间常数; γ_m 为经过测量环节后的关断角; θ_{max} 为最大逆变侧触发控制角; θ_{min} 为最小逆变侧触发控制角。

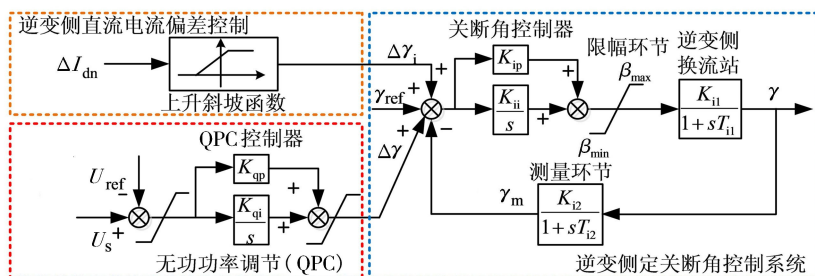


图 6 加入 QPC 的逆变侧直流控制系统

Fig. 6 DC control system with QPC at inverter side

QPC 采用 PI 控制器,其传递函数为

$$G_q(s) = K_{qp} + K_{qi}/s \quad (8)$$

在逆变侧固定关断角控制系统中,通过关断角控制器、限幅环节、逆变侧换流站、测量环节,依次对逆变侧关断角进行处理。关断角控制器采用 PI 控制器,其传递函数为

$$G_0(s) = K_{ip} + K_{ii}/s \quad (9)$$

将逆变侧换流站表示为一阶惯性环节形式,其传递函数为^[20]

$$G_1(s) = \frac{K_{i1}}{1 + sT_{i1}} \quad (10)$$

其中 $K_{i1} = \Delta\gamma/\Delta\beta \approx \sin\beta_0/\sin\gamma_0$ $T_{i1} = 0.02/12 = 1.667 \text{ ms}$

式中: β_0 取值为 38.2° ; γ_0 取值为 15° 。

测量环节可表示为一阶惯性环节^[21],其传递函数表示为

$$G_2(s) = \frac{K_{i2}}{1 + sT_{i2}} \quad (11)$$

式中: $K_{i2} = 1$, $T_{i2} = 0.02 \text{ s}$ 。

逆变侧定关断角控制系统的传递函数为

$$G_n(s) = G_0(s) G_1(s) G_2(s) = \frac{K_{i1} K_{i2} (K_{ii} + sK_{ip})}{(1 + sT_{i1})(1 + sT_{i2})} \quad (12)$$

目标函数 J_{obj_ITSE} 设计为逆变侧交流母线电压改变量 $\Delta U(t)$ 的平方乘以时间再积分,可表示为

$$J_{obj_ITSE} = \int_0^T t \Delta U^2(t) dt \quad (13)$$

利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件中 Optimum Run 对 QPC 参数进行寻优。在时间乘平方误差积分(ITSE)准则下,对 QPC 控制器的 PI 参数进行优化,应用 ITSE 性能指标可得到使目标函数最小的一组 PI 参数。

Optimum Run 以目标函数 J_{obj_ITSE} 的当前值作为输入,通过优化算法确定 QPC 控制器的 PI 参数 K_{qp} 和 K_{qi} 的值,优化算法选取了直接提供的单纯形算法。为防止无法搜索到最优值,可以设置最大仿真次数,当到达最大仿真次数时,运行自动停止。

QPC 控制是通过增加关断角来增加逆变站吸收故障后调相机的无功输出^[22],从而抑制逆变侧交流母线过电压,因此 QPC 控制参数与调相机励磁控制参数有关。根据故障后逆变侧交流母线电压恢复情况,选取较为理想的调相机励磁控制器与 QPC 的参数值。

4 仿真实验分析

基于 PSCAD/EMTDC 搭建含调相机的 HVDC 系统的数值仿真模型,如图 7 所示,图中, V_{acR} 为整流侧交流电压瞬时值, V_{rmsR} 为整流侧交流电压有效值, V_{acI} 为逆变侧交流电压瞬时值, V_{rmsI} 为逆变侧交流电压有效值, V_{ref} 为逆变侧交流电压参考值, V_{abc} 为逆变侧交流电压, I_f 为调相机励磁电流, T_e 为电磁转矩, T_m 为机械转矩, w 为转速,验证调相机与逆变侧关断角协调控制策略对提高系统稳定性的效果。

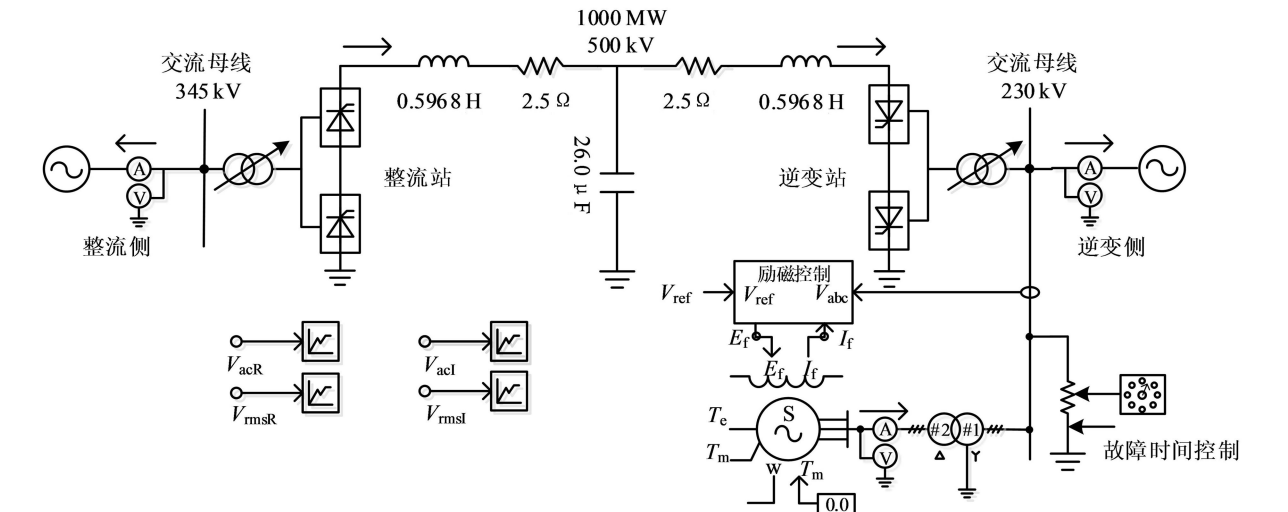


图 7 含调相机的 HVDC 系统的数值仿真模型

Fig. 7 Numerical simulation model of HVDC system with synchronous condenser

在系统运行 2.0 s 时逆变侧设置短路故障,并在故障后 0.2 s 清除故障,观察逆变侧交流母线电压恢复时间、故障时和故障消除后的逆变侧交流母线电压大小。

分别对如下 3 个案例在逆变侧交流系统发生短路故障下响应进行仿真分析:案例 1:HVDC 系统中未投入调相机,HVDC 控制系统中未加入 QPC;案例 2:在逆变侧交流系统中投入调相机,HVDC 控制系统中未加入 QPC;案例 3:在 HVDC 控制环节中加入 QPC,将调相机励磁控制与加入 QPC 的逆变侧关断角控制系统进行协调控制。

3 个案例的逆变侧交流母线电压仿真结果对比情况如图 8 所示,逆变侧交流母线电压恢复情况见表 1。由图 8 和表 1 可知,当采用案例 1 时,逆变侧交流母线电压降至 161.0 kV。在换相失败期间,为了增大换相裕度,逆变侧触发角将减小,

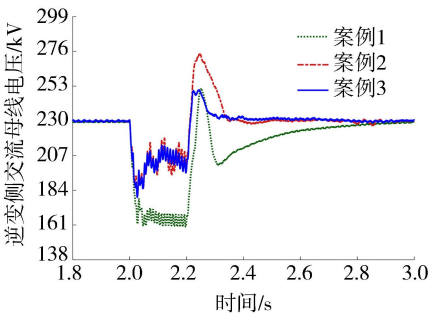


图 8 逆变侧交流母线电压

Fig. 8 AC bus voltage at inverter side

表 1 逆变侧交流母线电压的恢复情况

Table 1 Recovery of AC bus voltage at inverter side

案例	逆变侧交流母线电压恢复时间/ms	故障时逆变侧交流母线电压/kV	故障消除后逆变侧交流母线电压/kV
1	800	161.0	250.7
2	140	204.7	273.7
3	80	204.7	250.7

导致增加逆变站的无功消耗,从而降低了故障期间逆变侧交流母线电压。当采用案例 2 时,由于调相机瞬时发出大量无功功率,逆变侧交流母线电压可升至约 204.7 kV,加快故障后交流母线电压恢复时间。调相机的投入可提高故障期间的交流母线电压,但也易引起故障消除后交流母线电压升至 273.7 kV。与案例 1 相比,案例 3 在故障时的逆变侧交流母线电压升至约 204.7 kV,高于案例 1,有效提高故障时逆变侧交流母线电压。与案例 2 相比,案例 3 在故障消除后的逆变侧交流母线过电压降低了 23 kV,有效抑制故障后受端母线过电压。与案例 1 和案例 2 相比,案例 3 的逆变侧交流系统电压的恢复时间为 80 ms,低于案例 1 和案例 2,有效加快了逆变侧交流母线电压恢复时间。

从图 9 可以看出,与案例 1 和案例 2 相比,故障时的一次换相失败后,案例 3 的逆变侧关断角的上升幅值大于案例 1,其变化幅度小于案例 2,从而避免换相失败的再次发生。案例 3 的逆变侧关断角在 2.20 s 故障消除后快速上升,并在 2.30 s 后快速下降,在 2.20 ~2.30 s 之间,逆变站所吸收无功随关断角的增大而增加,有效抑制故障后逆变侧交流母线过电压。

从图 10 可以看出,故障时逆变侧直流电流瞬时增大,直流电压将下降,触发低压限流环节,直流电流指令值也将下降。案例 3 的逆变侧直流电流的振荡幅值小于案例 2。在 2.20 s 故障消除后,案例 3 的逆变侧直流电流与直流电流指令偏差远小于案例 1,说明案例 3 在故障后直流电流基本上跟随直流电流指令变化。

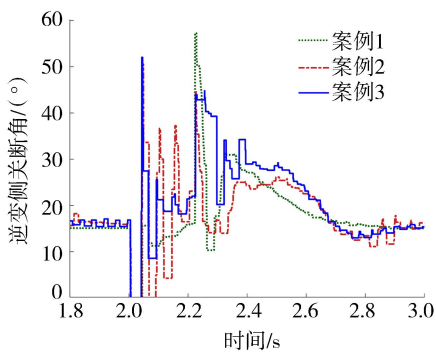


图 9 逆变侧关断角
Fig.9 Extinction angle at inverter side

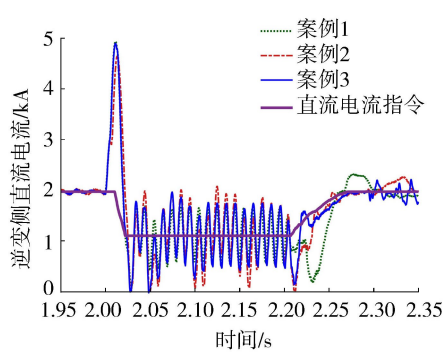


图 10 逆变侧直流电流
Fig.10 DC current at inverter side

5 结 语

针对 HVDC 系统受端电网故障消除后过电压问题,将调相机励磁控制与逆变侧关断角控制相协调,提出了调相机与逆变侧关断角协调控制策略,通过分析直流控制参数对直流输电系统的影响,引入无功调节器(QPC)到逆变侧关断角控制系统中,协调整定调相机无功调节参数和 QPC 控制参数。仿真结果表明,本文方法可有效降低故障后逆变侧换流站过电压,同时加快受端交流电压的恢复时间,提高故障后 HVDC 系统的安全稳定性。

参考文献:

[1] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术,2005(14):1-3. (YUAN Qingyun. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China[J]. Power System Technology,2005(14):1-3. (in Chinese))

[2] 鞠平,刘婧孜,秦川,等. 基于神经网络的光伏电站气象-功率模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):268-275. (JU Ping,LIU Jingzi,QIN Chuan, et al. Neural network based model of photovoltaic output power-weather information[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(3):268-275. (in Chinese))

[3] 张继生,汪国辉,林祥峰. 潮流能开发利用现状与关键科技问题研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):220-232. (ZHANG Jisheng,WANG Guohui,LIN Xiangfeng. A review of recent development and key technology problems in utilization of tidal stream energy[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(3):220-232. (in Chinese))

[4] 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. (in Chinese))

[5] AAMIR A,QIAO Li, GUO Chunyi, et al. Impact of synchronous condenser on the dynamic behavior of LCC-based UHVDC system hierarchically connected to AC System[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems,2019,5(2):190-198.

- [6] 金一丁,于钊,李明节,等.新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. 电网技术, 2018,42(7):2095-2102. (JIN Yiding, YU Zhao, LI Mingjie, et al. Comparison of new generation synchronous condenser and power electronic reactive-power compensation devices in application in UHV DC/AC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(7):2095-2102. (in Chinese))
- [7] 洪权,李辉,宋军英,等. $\pm 800\text{kV}$ 湘潭换流站调相机与特高压直流输电无功电压协调控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020,41(5):35-39. (HONG Quan, LI Hui, SONG Junying, et al. Study on reactive voltage coordinate control strategy for synchronous condenser of $\pm 800\text{ kV}$ Xiangtan Converter Station and UHVDC [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(5):35-39. (in Chinese))
- [8] 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. (in Chinese))
- [9] 陈波,熊华强,舒展,等. 含同步调相机的直流换流站稳态无功协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2020,40(11):156-164. (CHEN Bo, XIONG Huaqiang, SHU Zhan, et al. Steady-state reactive power coordinated control strategy for DC converter station with synchronous condenser[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11):156-164. (in Chinese))
- [10] 李辉,王震,周挺,等. 含同步调相机的直流受端换流站全工况下多模式协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2020,35(17):3678-3690. (LI Hui, WANG Zhen, ZHOU Ting, et al. Multi-mode coordinated control strategy for DC receiving converter station with synchronous condenser under full operating conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(17):3678-3690. (in Chinese))
- [11] 周挺,黄慧,刘林,等. 基于调相机的直流近区电压无功协调优化方法[J]. 智慧电力, 2019,47(11):54-59. (ZHOU Ting, HUANG Hui, LIU Lin, et al. Coordinative optimization method of reactive power in DC vicinity based on synchronous condenser [J]. Smart Power, 2019, 47(11):54-59. (in Chinese))
- [12] 涂仁川,赵成功,刘志军,等. 减小交直流电网无功交换的无功控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018,39(1):17-22. (TU Renchuan, ZHAO Chenggong, LIU Zhijun, et al. Study on reactive power control strategy for reducing reactive power exchange between AC and DC power grids [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(1):17-22. (in Chinese))
- [13] 肖鸣,傅闯,梁志飞. 高压直流低负荷无功优化功能运行分析[J]. 电力系统自动化, 2010,34(15):91-95. (XIAO Ming, FU Chuang, LIANG Zhifei. An operation analysis of HVDC low load reactive power optimization function [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15):91-95. (in Chinese))
- [14] 滕予非,汤涌,张鹏,等. 基于直流输电无功控制的多直流馈出电网交流系统过电压最优抑制策略[J]. 电网技术, 2017,41(12):3846-3853. (TENG Yufei, TANG Yong, ZHANG Peng, et al. An optimum strategy for suppressing AC overvoltage in systems with multiple HVDC links based on HVDC reactive power control [J]. Power System Technology, 2017, 41(12):3846-3853. (in Chinese))
- [15] 杨欢欢,蔡泽祥,朱林,等. 直流系统无功动态特性及其对受端电网暂态电压稳定的影响[J]. 电力自动化设备, 2017,37(10):86-92. (YANG Huanhuan, CAI Zexiang, ZHU Lin, et al. Dynamic characteristic of HVDC reactive power and its influence on transient voltage stability of receiving-end power grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10):86-92. (in Chinese))
- [16] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 杭州:浙江大学出版社,1995.
- [17] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [18] 徐政,蔡晔,刘国平. 大规模交直流电力系统仿真计算的相关问题[J]. 电力系统自动化, 2002(15):4-8. (XU Zheng, CAI Ye, LIU Guoping. Some problems in the simulation of large-scale ac/dc power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002(15):4-8. (in Chinese))
- [19] 李基成. 现代同步发电机励磁系统设计与应用[M]. 北京:中国电力出版社,2017.
- [20] 黄星海,陈威,傅闯,等. 基于不同建模的 HVDC 控制器参数优化方法[J]. 电力工程技术, 2019,38(6):37-46. (HUANG Xinghai, CHEN Wei, FU Chuang, et al. Parameter optimization of HVDC controller based on different modeling [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6):37-46. (in Chinese))
- [21] 杨汾艳,徐政,张静. 直流输电比例-积分控制器的参数优化[J]. 电网技术, 2006(11):15-20. (YANG Fenyan, XU Zheng, ZHANG Jing. Study on parameter optimization of HVDC PI controllers [J]. Power System Technology, 2006(11):15-20. (in Chinese))
- [22] 邱丽霓. 特高压直流输电无功配置与电压稳定研究[D]. 北京:华北电力大学,2010.