

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240152

基于谐波检测的调相机失磁保护研究

邓茂军^{1,2}, 孙小伟¹, 朱云峰², 李文正², 黄继东²

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 首先对现有的调相机失磁保护进行分析, 结果表明在系统低电压工况下调相机发生部分失磁故障, 现有的失磁保护不能可靠动作, 保护存在死区。通过研究调相机失磁后的励磁电流变化规律, 得出调相机发生失磁故障后气隙合成磁势中含有高次谐波分量, 将在定子绕组中产生对应的谐波电流。在此基础上, 提出了一种基于谐波检测的调相机失磁保护方法。利用定子绕组中偶次谐波电流含量构建新的失磁保护策略, 解决了系统低电压工况下失磁保护不能识别部分失磁故障的问题。最后, 通过 PSCAD/EMTDC 建立了带有调相机的扎鲁特-青州±800 kV 特高压直流输电模型, 仿真结果验证了该方案的可行性。

关键词: 调相机; 失磁保护; 部分失磁; 偶次谐波; 谐波检测

Excitation loss protection strategy for a synchronous condenser based on harmonic detection

DENG Maojun^{1,2}, SUN Xiaowei¹, ZHU Yunfeng², LI Wenzheng², HUANG Jidong²

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: First, the existing field loss protection of a synchronous condenser is analyzed. The results show that the existing protection cannot reliably act in the case of a partial field loss fault of the condenser in the low voltage condition of the system, and the protection has a dead zone. By studying the variation law of the excitation current after the loss of excitation of the synchronous condenser, it is concluded that the air gap synthetic magnetic potential contains high-order harmonic components after the loss of excitation fault of the condenser, and a corresponding harmonic current will be generated in the stator winding. Thus a method of excitation loss protection of the condenser based on harmonic detection is proposed. A new excitation loss protection strategy is constructed using the even-order harmonic current content in the stator winding. This solves the problem that the loss of excitation protection cannot identify partial loss of excitation faults in low voltage conditions of the system. Finally, a Zhalute-Qingzhou ±800 kV UHVDC transmission model with a synchronous condenser is established in PSCAD/EMTDC, and the simulation results verify the feasibility of the scheme.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900603).

Key words: synchronous condenser; field loss protection; partial field loss; even-order harmonic; harmonic detection

0 引言

随着大规模新能源的接入以及大容量、远距离特高压直流输电技术的推广应用, 特高压直流送受端对于无功补偿的容量需求越来越大, 系统动态无功支撑能力不足日益突出, 易引发换相失败、电压不稳定等问题^[1-7]。新型调相机具有快速灵活调节无功出力、短时强励等特点, 能全面提高系统动态无功水平和改善系统电压稳定水平, 在特高压直流送

受端得到广泛的应用^[8-12]。

失磁故障是调相机常见的涉网故障^[13], 调相机与发电机失磁特性不同, 由于调相机没有原动机, 失磁后仍能保持同步运行状态, 所以在发电机失磁保护中广泛应用的阻抗圆判据不再适用^[14], 为调相机失磁保护配置带来了困难。

针对上述问题, 文献[15]分析了调相机失磁保护与发电机的不同, 给出了调相机失磁保护锥形, 但并未详细分析; 文献[16]针对在深度进相运行工况下由触发脉冲丢失引起的部分失磁故障, 提出了脉波方均根值判据; 文献[17]从调相机发生失磁故

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900603)

障与稳态调节时无功变化速率不同考虑,提出了基于进相速率的调相机失磁保护策略;文献[18]通过分析失磁故障特征及失磁后调相机在暂态过程中的无功响应,研究了由励磁绕组短路引起的部分失磁故障,提出了基于励磁电流差异的失磁保护策略。现有对于系统低电压工况下的部分失磁保护研究较少,已无法满足复杂电网背景下失磁保护可靠性和灵敏性的需求,需要对保护方案进行改进。

本文通过对调相机失磁保护方案进行研究,提出了一种基于谐波检测的调相机失磁保护方法。利用定子绕组中偶次谐波电流含量构建了新的失磁保护策略,解决了失磁保护不能识别系统低电压工况下部分失磁故障的问题,通过 PSCAD 仿真结果验证了新方案的可行性。

1 调相机失磁特性分析

调相机失磁故障主要是由灭磁开关偷跳、转子绕组故障及励磁机故障等引起的失磁故障,其中转子绕组及励磁机故障引起的励磁电压下降但并未下降为零称为部分失磁故障。现有的失磁保护采用两段式保护^[19]:失磁保护 I 段从保护系统电压稳定的角度出发,以调相机机端电压、系统电压和无功功率反向为判据;失磁保护 II 段主要目标是保护调相机,保护判据由励磁低电压与无功功率反向判据组成。文中系统低电压工况为调相机滞相运行,即调相机发出感性无功功率。

在系统低电压工况下,调相机发出感性无功功率支撑系统电压稳定,若此时调相机发生失磁故障,调相机由发出无功功率变为吸收无功功率,严重影响系统电压稳定。而在系统低电压工况下发生调相机部分失磁故障,由于励磁电压并未下降为零,励磁低电压判据与无功功率反向判据可能不满足动作条件,失磁保护存在死区。

以调相机励磁回路中某一晶闸管发生故障或触发脉冲丢失为例,发生故障后励磁电压有效值 E'_r ^[16]如式(1)所示。

$$E'_r = \frac{3\sqrt{2}U}{2\pi} \left(\sin\left(\frac{2\pi}{3} + \alpha\right) + \sqrt{3} \cos \alpha \right) \quad (1)$$

式中: U 为交流侧电压有效值; α 为触发角。由式(1)可知,发生故障后调相机励磁电压有效值与触发角 α 有关,即发生触发脉冲丢失引起失磁故障后励磁绕组残余励磁电压值不为 0,调相机机端电压及系统电压可能仍然高于失磁保护整定值,失磁保护拒动作。

调相机励磁回路等效模型如图 1 所示。调相机

正常运行时,励磁绕组上电压为 U_r ,发生失磁故障后,励磁绕组上电压为 U'_r ,在励磁电压变化阶段励磁回路等效模型近似为一阶线性电路,励磁电流 $I_f(t)$ 为

$$I_f(t) = \frac{1}{r_f} \left[U'_r + (U_r - U'_r) e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (2)$$

式中: r_f 为励磁阻抗; τ 为励磁回路时间常数。

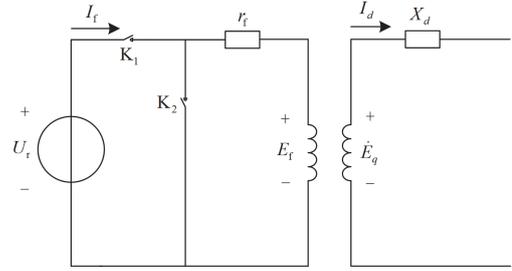


图 1 励磁回路等效模型

Fig. 1 Equivalent model of excitation circuit

故障后励磁电流经过傅里叶变换后如式(3)所示。

$$I_f = \frac{U_r - U'_r}{r_f} \left[\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_{2n-1} \cos\left(\frac{2n-1}{T}\pi t\right) + \sum_{n=1}^{\infty} a_{2n} \cos\left(\frac{2n}{T}\pi t\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_{2n-1} \sin\left(\frac{2n-1}{T}\pi t\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_{2n} \sin\left(\frac{2n}{T}\pi t\right) \right] + N \frac{U'_r}{r_f} \quad (3)$$

式中: $a_0 = c/2$, $c = e^2 - e^{-2}$; $a_{2n-1} = -T\tau c / (T^2 + (2n-1)^2\pi^2\tau^2)$; $a_{2n} = T\tau c / (T^2 + (2n)^2\pi^2\tau^2)$; $b_{2n-1} = -(2n-1)\pi c \tau^2 / (T^2 + (2n-1)^2\pi^2\tau^2)$; $b_{2n} = 2n\pi c \tau^2 / (T^2 + (2n)^2\pi^2\tau^2)$; T 为发生故障后一阶线性电路过渡到稳态所需时间的二分之一, T 一般取值 $2\tau \sim 3\tau$; N 为励磁回路绕组匝数。

励磁线圈产生的旋转磁动势 F_f 为

$$F_f = N \frac{U_r - U'_r}{2r_f} \left[a_0 \cos \omega t + \sum_{n=1}^{\infty} a_{2n-1} \cos\left(\frac{2n-1}{T}\pi + \omega\right)t + \sum_{n=1}^{\infty} a_{2n-1} \cos\left(\frac{2n-1}{T}\pi - \omega\right)t + \sum_{n=1}^{\infty} a_{2n} \cos\left(\frac{2n}{T}\pi + \omega\right)t + \sum_{n=1}^{\infty} a_{2n} \cos\left(\frac{2n}{T}\pi - \omega\right)t + \sum_{n=1}^{\infty} b_{2n-1} \sin\left(\frac{2n-1}{T}\pi + \omega\right)t + \sum_{n=1}^{\infty} b_{2n-1} \sin\left(\frac{2n-1}{T}\pi - \omega\right)t + \sum_{n=1}^{\infty} b_{2n} \sin\left(\frac{2n}{T}\pi + \omega\right)t + \sum_{n=1}^{\infty} b_{2n} \sin\left(\frac{2n}{T}\pi - \omega\right)t \right] + N \frac{U'_r}{r_f} \cos \omega t \quad (4)$$

式中: ω 为转子角速度; F_σ 为气隙合成磁势,如式

(5)所示。

$$F_{\sigma} = F_r + F_a \quad (5)$$

式中, F_a 为定子合成磁势。由于定子侧多采用特定的绕组削弱高次谐波磁势, 所以定子侧合成磁势中只计及基波影响, 不会影响气隙合成磁势谐波次数。则定子侧感应电动势 e 为

$$e = 4.44fN_y F_{\sigma} \Lambda k_y \quad (6)$$

式中: f 为旋转磁势频率; N_y 为定子线圈匝数; Λ 为磁导率; k_y 为短距系数。由式(4)可知, 当 $(2n-1)\pi/T$ 或 $(2n)\pi/T$ 为 ω 、 3ω 、 5ω 时, 气隙合成磁势中将产生偶次谐波分量, 则在定子侧感应电动势中产生偶次谐波电势, 进而产生偶次谐波电流。因此, 可以通过检测定子回路中的偶次谐波电流识别调相机失磁故障。

2 基于谐波检测的失磁保护方案

定义 a 为调相机定子回路中偶次谐波电流含量, 由式(3)、式(5)和式(6)可知, 定子侧高次谐波电动势随着谐波次数的增大而下降, 所以定子侧谐波电流只取 2、4 次谐波电流, 忽略 6 次及以上的偶次谐波并不影响其检测结果。

$$a = \frac{I_2 + I_4}{I_1} \times 100\% \quad (7)$$

式中: I_1 为定子回路中基波电流有效值; I_2 、 I_4 分别为 2、4 次谐波电流有效值。

调相机正常运行时, a 很低, 当发生失磁故障后, a 增大, 则谐波检测判据为

$$a > a_{\text{set}} \quad (8)$$

式中, a_{set} 为谐波检测判据整定值。在调相机正常运行时或进行正常的无功调节时, 由于调相机无功外环调节速度非常缓慢^[20], 励磁电流变化速率很小, 所以 a 很小, 接近于 0, 当调相机发生失磁故障后, 由于励磁电流迅速下降, 气隙合成磁势中偶次谐波含量增加, a 相应增大, 为避免系统谐波干扰, 谐波检测判据整定值取 2。

为避免调相机外部发生短路故障及系统电压突增时, 由于故障电流及系统电压突增引起谐波检测判据误动作, 引入励磁电压方向判据和系统电压方向闭锁判据, 调相机发生失磁故障后, 励磁电压与系统电压呈下降状态, 则励磁电压方向判据为

$$|E_{\Delta t} - E_t| > \Delta E_{\text{set}} \quad (9)$$

$$E_t > E_{\Delta t} \quad (10)$$

系统电压方向闭锁判据为

$$U_{\Delta t} - U_t > \Delta U_{\text{set}} \quad (11)$$

式中: Δt 为时间间隔; E_t 、 U_t 分别为励磁电压、系统电压; $E_{\Delta t}$ 为与 E_t 相差 Δt 时间间隔的励磁电压; ΔE_{set} 为励磁电压变化量整定值; ΔU_{set} 为系统电压变化量整定值。

励磁电压方向判据和系统电压方向闭锁判据应按照励磁电压正常调节和系统电压正常波动不动作, 在外部发生不对称故障和投入交流滤波器组引起的系统电压突增时保护能够可靠闭锁, 对于扎鲁特—青州直流输电系统中时间间隔 Δt 取 0.5 s, 为保证系统电压方向闭锁判据在投入滤波器组后能够可靠闭锁, 整定值 ΔU_{set} 取 0.01, 励磁电压方向判据按照躲过正常无功调节整定, 整定值 ΔE_{set} 取 0.05。

改进后的失磁保护 I 段方案如图 2 所示。在系统电压方向闭锁判据不动作情况下, 在励磁电压方向判据与谐波检测判据均满足时, 失磁保护动作跳闸, 且跳闸信号延长 t_3 时间。在系统电压突增时, 由于励磁控制系统快速调节, 使得励磁电压迅速下降, 励磁电压方向判据与谐波检测判据可能会误动作, 此时系统电压方向闭锁判据动作, 在 t_1 时间内保护闭锁, 不动作。由于谐波检测判据满足时刻可能滞后于励磁电压方向判据, 将励磁电压方向判据输出结果展宽 t_2 时间。基于谐波检测的调相机失磁保护从保护系统稳定的角度出发, 仅考虑系统低电压工况下的调相机失磁保护, 需要与现有的失磁保护 II 段配合。

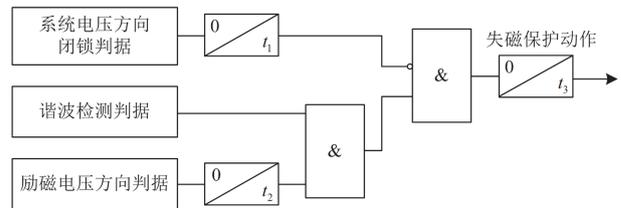


图 2 基于谐波检测的失磁保护逻辑图

Fig. 2 Logical diagram of loss-of-excitation protection based on harmonic detection

3 仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 中建立扎鲁特—青州±800 kV 特高压直流输电模型, 如图 3 所示。在受端接入调相机, 扎鲁特站的额定电压为 530 kV, 青州站额定电压为 515 kV, 额定输送容量为 10 000 MW^[21-22]。

调相机额定容量为 300 Mvar, 额定电压为 20 kV, 直轴同步电抗为 1.53 p.u., 最大进相为 150 Mvar, 变压器额定容量为 360 MVA, 变比为 20/515, 短路阻抗为 12%。

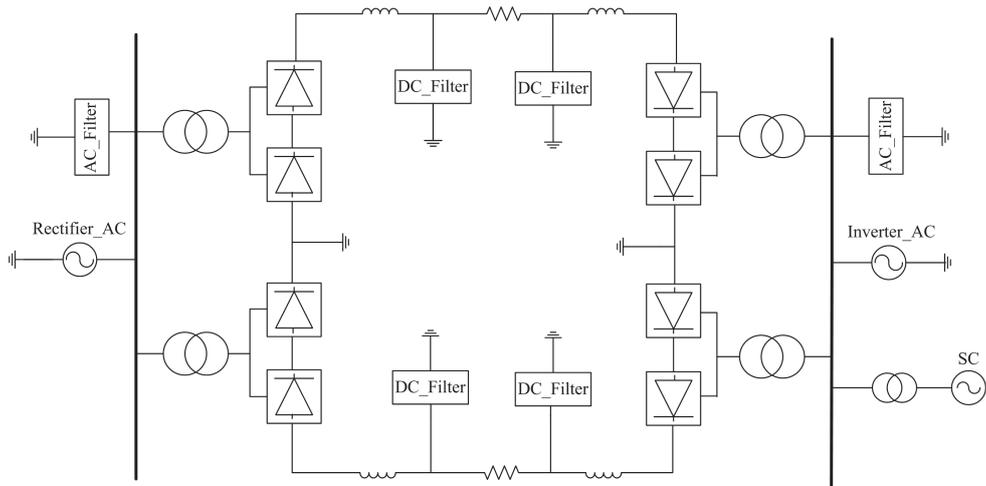


图 3 特高压直流输电系统结构图

Fig. 3 UHVDC transmission system structure diagram

以常见的由触发脉冲丢失引起的调相机部分失磁故障为例，对接入交直流输电系统的调相机进行以下 4 种仿真。

1) 仿真 1: 在系统低电压工况下，调相机输出无功功率 Q_{sc} 分别为 0.3 p.u.、0.6 p.u.和 1 p.u.时，在 1 s 时发生部分失磁故障，对比基于谐波检测的失磁保护策略与现有的失磁保护 I 段的可靠性，系统电压、机端电压和谐波检测判据、励磁电压方向判据波形如图 4、图 5 所示。

由图 4 可知，在调相机发生部分失磁故障后，机端电压与励磁电压虽然都下降，但其值均大于失磁保护 I 段整定值 0.9，不满足失磁保护 I 段动作判据，现有的失磁保护拒动。而由图 5 可知，在发生部分失磁故障后，谐波检测判据与励磁电压方向判据均超过整定值，满足动作条件，基于谐波检测的

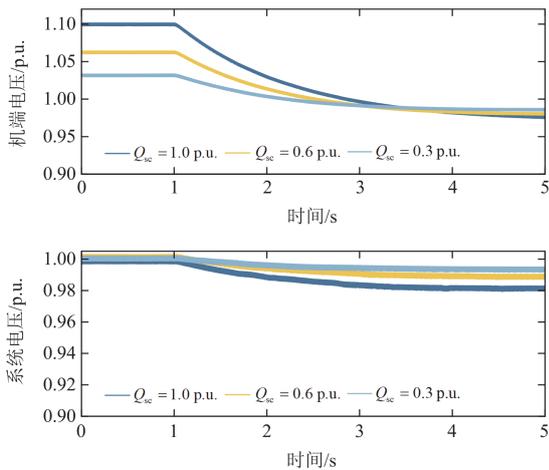


图 4 部分失磁机端电压、系统电压波形图

Fig. 4 Terminal voltage and system voltage waveforms of partial loss of excitation

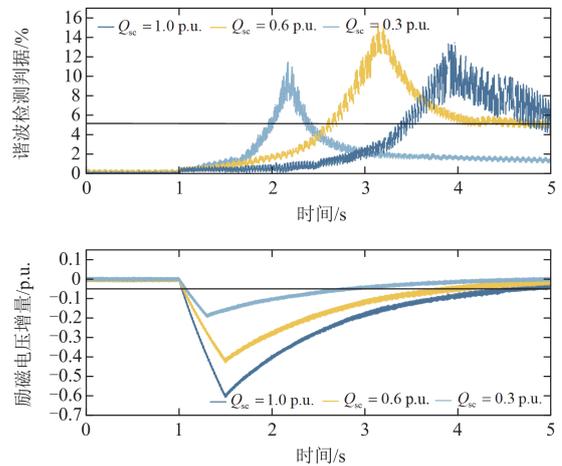


图 5 部分失磁谐波检测判据、励磁电压方向判据结果
Fig. 5 Harmonic detection criterion and excitation voltage criterion results of partial loss of excitation

失磁保护 I 段能够可靠识别部分失磁故障，保护性能优于现有的失磁保护 I 段。

2) 仿真 2: 在系统低电压工况下，调相机输出无功功率 Q_{sc} 分别为 0.3 p.u.、0.6 p.u.及 1.0 p.u.时，在 1 s 时发生全失磁故障，失磁故障后励磁电压方向判据与谐波检测判据如图 6 所示。调相机在不同运行工况下发生全失磁故障后，谐波检测判据与励磁电压方向判据均超过整定值，也即基于谐波检测的失磁保护方案能够识别不同工况下全失磁故障。

3) 仿真 3: 当系统稳态运行时，调相机输出无功功率维持电压稳定，1 s 时在母线近端发生单相接地点故障，经过 0.5 s 后故障被切除，谐波检测判据、系统电压方向闭锁判据与励磁电压方向判据如图 7、图 8 所示。由图 7、图 8 可知，在母线侧发生单

相接地故障后, 由于负序电流的影响, 调相机定子侧二次谐波电流增大, 使得谐波检测判据超出整定值, 但由于母线电压降低, 调相机励磁控制系统快速励磁, 励磁电压升高, 调相机发出大量的无功功率, 对系统电压提供支撑能力, 励磁电压方向判据不满足动作值, 失磁保护不动作。在切除故障后母线电压恢复阶段, 由于母线电压瞬间抬高, 但仍未恢复到额定值, 调相机励磁控制系统维持励磁电压缓慢上升, 励磁电压方向判据不满足动作要求, 且由于系统电压突然抬高, 系统电压方向闭锁判据启动, 在 t_1 时间内保护闭锁, 不动作, 失磁保护可靠不动作。所以, 在系统发生不对称故障及故障切除后母线电压恢复阶段, 虽然谐波检测判据超出整定值, 但由于励磁电压方向判据不动作和系统电压方向判据闭锁保护, 失磁保护新方案能可靠不动作。

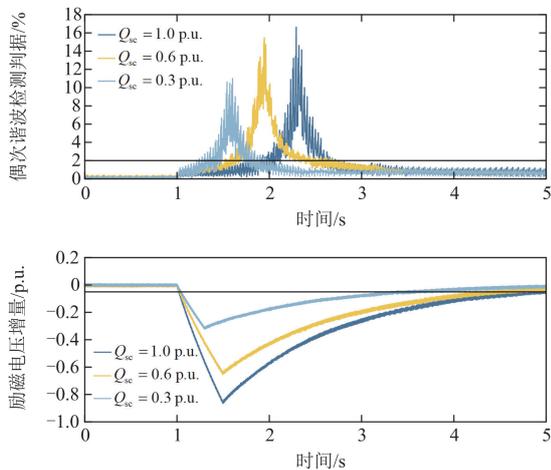


图 6 全失磁谐波检测判据、励磁电压方向判据结果
Fig. 6 Results of full demagnetization harmonic detection criterion and excitation voltage criterion

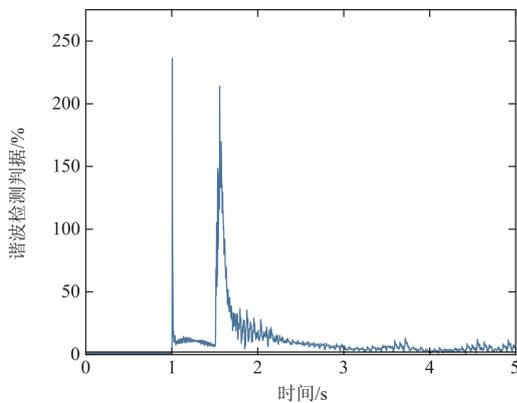


图 7 母线侧发生短路谐波检测判据结果
Fig. 7 Harmonic detection criterion results of short circuit fault on bus side

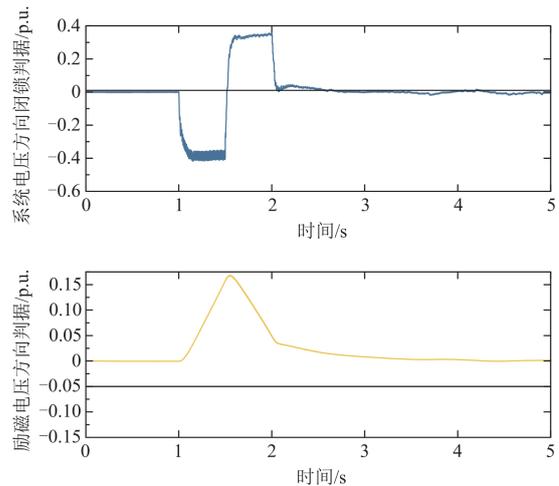


图 8 系统电压方向闭锁判据、励磁电压方向判据结果
Fig. 8 System high voltage blocking criterion and excitation voltage direction criterion results

直流系统换相失败的主要原因是交流系统故障所引起的换相电压变化。在换相失败期间, 逆变站的无功需求增加, 交流电压未恢复时, 逆变站从交流侧吸收无功功率, 造成母线电压二次下降^[23]。此时由于母线电压下降, 调相机励磁电压将会上升, 调相机发出无功功率, 维持母线电压稳定, 与母线故障引起母线电压下降类似, 励磁电压方向判据不满足动作条件, 保护能够可靠不动作。

4) 仿真 4: 系统稳态运行时, 当换流站投入一组交流滤波器引起系统电压突增时, 谐波检测判据如图 9 所示, 系统电压方向闭锁判据与励磁电压方向判据如图 10 所示。在系统电压突增后, 励磁系统通过跟踪机端电压给定值快速调节励磁系统输出, 即降低励磁电压值, 减少调相机发出的无功功率, 维持系统电压稳定。虽然在系统电压突增后谐波检测判据和励磁电压方向判据均超过整定值, 但由于系统电压突增, 系统电压方向闭锁判据动作, 闭锁

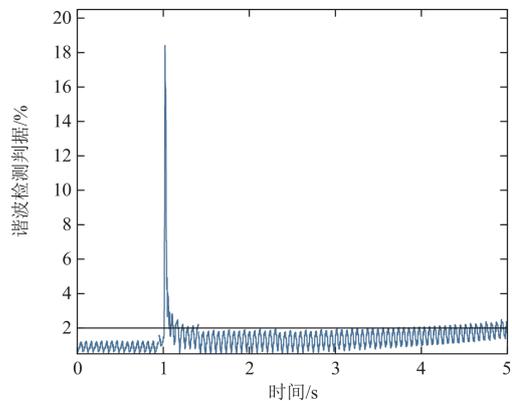


图 9 谐波检测判据结果
Fig. 9 Harmonic detection criterion results

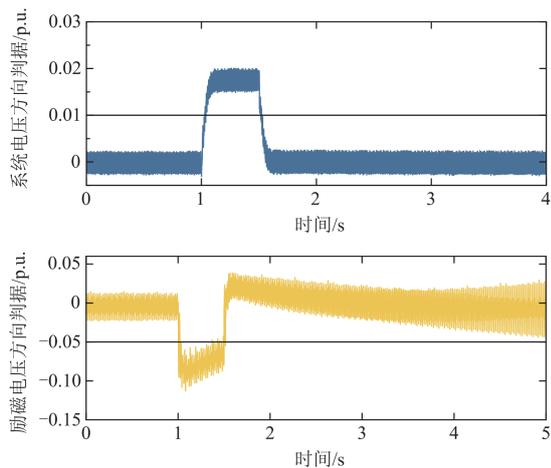


图 10 系统电压方向闭锁判据、励磁电压方向判据结果

Fig. 10 System high voltage blocking criterion and excitation voltage direction criterion results

保护，避免保护误动作。

通过以上分析：在系统低电压工况下，基于谐波检测的调相机失磁保护策略均能可靠识别调相机部分失磁及全失磁故障。在系统投入交流滤波器引起系统电压突增情况下，保护新方案能够可靠闭锁，在母线故障与直流侧换相失败时，保护不动作。通过与现有失磁保护 I 段对比，在调相机发生部分失磁故障后，调相机失磁保护新策略能可靠动作，保护性能优于现有的失磁保护 I 段。

4 结论

本文对系统低压工况下调相机发生部分失磁故障进行分析，结果表明现有的失磁保护在系统低电压工况下存在死区。通过研究调相机失磁特性，得出调相机失磁后励磁电流中含有高次谐波分量，定子侧将有偶次谐波电流产生，提出了一种基于谐波检测的调相机失磁保护新方案。最后，通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证，结果表明新方案在系统低电压工况下部分失磁及全失磁故障都能可靠动作，在外部系统发生短路故障和系统电压突增情况下均能够可靠闭锁，不会误动作。新方案易于实现、可靠性高，能够满足特高压直流送受端对系统电压稳定的要求。

参考文献

[1] 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.
- [2] 俞翔, 鲁江, 董云龙, 等. 适用于特高压多端混合直流输电系统的稳态电压控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 174-180.
YU Xiang, LU Jiang, DONG Yunlong, et al. A steady-state voltage control method for a multi-terminal hybrid UHVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 174-180.
- [3] 王渝红, 陈立维, 曾琦, 等. 特高压直流分层接入方式下预防换相失败的协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 160-170.
WANG Yuhong, CHEN Liwei, ZENG Qi, et al. Coordinated control strategy for preventing commutation failure in a UHVDC system hierarchically connected to an AC grid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 160-170.
- [4] 黄志光, 曹路, 李建华, 等. 混合多馈入直流作用下江苏受端电网安全稳定评估及改善[J]. 中国电力, 2021, 54(9): 55-65.
HUANG Zhiguang, CAO Lu, LI Jianhua, et al. Evaluation and improvement of security and stability of Jiangsu receiving-end power grid with hybrid multi-infeed DC[J]. Electric Power, 2021, 54(9): 55-65.
- [5] 江叶峰, 鲍颜红, 张金龙, 等. 应对直流连续换相失败的动态无功备用评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 173-180.
JIANG Yefeng, BAO Yanhong, ZHANG Jinlong, et al. Dynamic reactive power reserve evaluation for DC continuous commutation failure[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 173-180.
- [6] 汤奕, 郑晨一. 高压直流输电系统换相失败影响因素研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 499-513.
TANG Yi, ZHENG Chenyi. Review on influencing factors of commutation failure in HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 499-513.
- [7] 刘江山, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 换相失败引发送端混合级联直流系统换流母线暂态电压波动机理及抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 36-46.
LIU Jiangshan, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Mechanism of and suppression strategy for transient voltage fluctuation in the commutator bus of a hybrid cascaded DC system caused by commutation failure[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 36-46.
- [8] 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.
- [9] 黄华, 潘学萍, 李乐, 等. 并网大容量调相机对交直流电力系统无功电压灵敏度的影响[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 162-167.
HUANG Hua, PAN Xueping, LI Le, et al. Effect of

- integrated large capacity synchronous condenser on reactive power and voltage sensitivity for AC/DC power system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(12): 162-167.
- [10] 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.
- [11] 袁彬, 李辉, 向学位, 等. 考虑调相机饱和参数的分阶段励磁控制优化策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(15): 42-54.
YUAN Bin, LI Hui, XIANG Xuwei, et al. Optimization strategy of phased excitation control considering phase modulator saturation parameters[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(15): 42-54.
- [12] 王雅婷, 张一驰, 周勤勇, 等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. *电网技术*, 2017, 41(1): 22-28.
WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(1): 22-28.
- [13] 罗凌, 李振文, 宋兴荣, 等. 大容量调相机继电保护配置方案研究[J]. *湖南电力*, 2016, 36(5): 26-30.
LUO Ling, LI Zhenwen, SONG Xingrong, et al. Study on the relay protection scheme of high capacity synchronous condenser[J]. *Hunan Electric Power*, 2016, 36(5): 26-30.
- [14] 潘仁秋, 何其伟, 陈俊. 大型调相机的保护配置及其实现[J]. *江苏电机工程*, 2011, 30(6): 45-47.
PAN Renqiu, HE Qiwei, CHEN Jun. Implementation of protection configuration for large scale synchronous condenser[J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2011, 30(6): 45-47.
- [15] 邹东霞, 余锐, 聂娟红, 等. 300 Mvar 大型同步调相机的启动及继电保护[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(20): 160-164.
ZOU Dongxia, YU Rui, NIE Juanhong, et al. SFC start and relay protection of 300 Mvar large synchronous condenser[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(20): 160-164.
- [16] 郑作伟, 郑玉平, 潘书燕, 等. 调相机失磁保护励磁电压判据性能分析与改进[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(10): 174-179.
ZHENG Zuowei, ZHENG Yuping, PAN Shuyan, et al. Performance analysis and improvement of excitation voltage criterion for loss of excitation protection of condenser[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(10): 174-179.
- [17] 曹虹, 周泽昕, 柳焕章, 等. 基于进相速率的调相机失磁保护研究[J]. *电网技术*, 2020, 44(10): 4011-4019.
CAO Hong, ZHOU Zexin, LIU Huanzhang, et al. New field loss protection for synchronous condenser based on advancing velocity[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(10): 4011-4019.
- [18] 郭智琳, 郝亮亮, 曹虹, 等. 基于励磁电流差异的调相机失磁保护方案[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(12): 178-186.
GUO Zhilin, HAO Liangliang, CAO Hong, et al. Excitation loss protection scheme based on excitation current difference for synchronous condenser[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(12): 178-186.
- [19] 国家电网有限公司. 调相机变压器组保护技术规范: Q/GDW11767—2017[S]. 2017.
State Grid Corporation of China. Technical specification for synchronous condenser transformer unit protection equipment: Q/GDW11767—2017[S]. 2017.
- [20] 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.
- [21] 罗汉武, 乐健, 毛涛, 等. 扎鲁特—青州±800 kV 特高压直流输电工程运行特性分析[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(1): 53-59.
LUO Hanwu, LE Jian, MAO Tao, et al. Analysis of operation characteristics of Zhalute-Qingzhou ±800 kV UHVDC system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(1): 53-59.
- [22] 罗汉武, 乐健, 毛涛, 等. 扎鲁特—青州±800 kV 特高压直流输电工程主回路参数设计[J]. *高压电器*, 2018, 54(4): 128-134.
LUO Hanwu, LE Jian, MAO Tao, et al. Study and design of main circuit parameters for ±800 kV UHVDC transmission project from Zhalute to Qingzhou[J]. *High Voltage Apparatus*, 2018, 54(4): 128-134.
- [23] 林圣, 刘健, 刘磊, 等. 基于控制保护的高压直流输电系统换相失败抑制方法综述[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(19): 6045-6059.
LIN Sheng, LIU Jian, LIU Lei, et al. A review of commutation failure suppression methods for HVDC systems based on control protection measures[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(19): 6045-6059.

收稿日期: 2024-02-02; 修回日期: 2024-04-18

作者简介:

邓茂军(1975—), 男, 通信作者, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事保护控制产品研发工作; E-mail: xjtc_dengmaojun@126.com

孙小伟(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: 202108080021041@ctgu.edu.cn

(编辑 魏小丽)