

基于励磁电流差异的调相机失磁保护方案

郭智琳¹, 郝亮亮¹, 曹虹², 王兴国²

(1. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044; 2. 中国电力科学研究院 电网安全与节能国家重点实验室, 北京 100192)

摘要:首先研究了调相机的失磁故障行为及失磁调相机的暂态响应,结果表明已处于失磁状态的调相机在系统电压变化时仍有一定的无功响应能力。在此基础上,分析了基于无功反向特征的已有失磁保护方案在故障检测及保护动作方式上的不足。为了进一步优化调相机的失磁保护,深入研究了调相机的失磁过程并得出了失磁故障后励磁电源输出的测量励磁电流与励磁磁动势对应的实际励磁电流大小存在明显差异的故障特征。然后建立了实际励磁电流的计算模型,解决了实际励磁电流值不能直接测量的问题。在此基础上,构建了基于励磁电流差异特征的失磁保护判据,优化了保护动作方式,提出了相应的调相机失磁保护方案。最后,在PSCAD中建立了包含调相机在内的实际直流输电系统模型,通过仿真对比已有失磁保护方案及所提失磁保护方案的作用,结果验证了所提失磁保护方案的有效性。

关键词:调相机; 高压直流输电; 动态无功补偿; 失磁保护; 换相失败

中图分类号: TM 342

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202108032

0 引言

新能源的大规模接入及特高压直流系统的快速发展在显著提升电网资源配置能力的同时也为系统运行带来更为复杂艰巨的挑战^[1-2]:直流送端网架薄弱,暂态过电压易引发新能源大规模脱网;直流受端动态无功支撑能力不足,暂态低电压易引发同时、连续的换相失败故障,甚至导致直流闭锁,冲击交流电网。为了减少上述问题的发生,需要加强电网的动态无功建设,提升电网电压控制能力^[3]。

作为一种传统的无功补偿设备,调相机(SC)具有快速灵活调节无功出力的特点,能全面提高系统的动态无功水平,在特高压直流系统中有着广阔的应用前景^[4]。相关文献表明^[5-6],装设于电网中的新一代大容量调相机在直流送、受端暂态过程中分别用于吸收、提供无功功率,能够维持接入点的系统电压稳定,对缓解新能源高压脱网及减少多回直流线路同时换相失败都有着重要作用。

失磁故障是常见的调相机涉网故障。研究表明^[7-8],与发电机失磁不同,调相机失磁后能始终保持同步运行状态,但失磁调相机会从系统中吸收无功功率。对于电网而言,失磁调相机的无功功率吸收作用可能对系统(尤其是易因低电压引发换相失败的直流受端)的安全运行造成威胁。因此,调相机失磁保护的正确动作对于电网的安全运行有着重要

的作用。然而,在故障识别方面,基于失磁后异步特征的发电机常用失磁保护判据,如静稳圆、异步圆等不再适用于调相机。而由于正常调相机具有双向无功调节作用,仅通过反向无功功率很难准确区分调相机的失磁工况与正常进相工况。此外,由于在不同典型暂态工况下的直流系统对无功功率的需求不同,失磁调相机对系统运行的影响也存在差异,如吸收无功功率的失磁调相机在过电压整流侧的积极作用及在低电压逆变侧的消极影响。因此,从最大限度地保证电网安全稳定运行的角度出发,调相机失磁保护的動作方式也会更复杂。

目前,文献[9-10]探讨了调相机的失磁故障特点及保护配置要求,但这些研究主要集中在设备本身而没有关注失磁故障对直流系统造成的影响;文献[11-12]从系统角度分析受端失磁调相机对直流系统运行的影响,对受端调相机的失磁保护配置提出了一定的建议;文献[13]针对触发脉冲丢失工况引起的失磁故障提出了基于励磁电压判据的优化方案。国网已有的失磁保护方案综合考虑了调相机在系统中的不同需求^[14],但仍主要基于反向无功功率进行失磁检测,其不足之处本文也将进行详细分析。总体而言,目前应用于直流系统中的调相机失磁保护仍缺少足够的理论支撑,保护方案也存在优化的空间。

本文对应用于特高压直流系统的调相机失磁保护方案进行研究。首先分析了调相机的失磁特征及失磁调相机的暂态响应,并基于此指出了已有的调相机失磁保护方案在故障识别及保护动作等方面的不足。然后对调相机失磁过程进行了深入研究,得出了失磁故障后励磁电源输出的测量励磁电流与实际励磁磁动势对应的实际励磁电流值存在明显差

收稿日期:2020-12-23;修回日期:2021-07-01

基金项目:电网安全与节能国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司)开放基金资助项目(JBB51201901229)

Project supported by the Open Fund of State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation(China Electric Power Research Institute)(JBB51201901229)

异的结论。由于实际励磁电流无法被直接量测,通过机端电压、电流等参数建立了实际励磁电流的计算模型。在此基础上,构建了基于励磁电流差异特征的失磁保护判据,优化了保护动作方式,提出了新型调相机失磁保护方案。最后,通过对实际直流系统进行电磁暂态仿真,对比已有保护方案与本文保护方案的实际表现,结果验证了本文保护方案的有效性。若无特别说明,本文中的变量均采用标么值。

1 调相机失磁行为及已有的失磁保护方案分析

1.1 调相机失磁行为及保护需求分析

调相机采用自并励结构,励磁回路的工作状态直接影响其无功调节能力。失磁故障指由于励磁回路中的某些事故,如励磁绕组短路、灭磁开关偷跳等导致励磁电流及励磁能力的丢失。本文基于图 1 所示的单机无穷大系统分析调相机失磁行为。

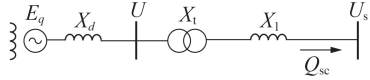


图 1 单机无穷大系统接线图

Fig.1 Wiring diagram of single-machine infinite-bus system

调相机输入单机无穷大系统的无功功率 Q_{sc} 可以表示为:

$$Q_{sc} = \frac{E_q U_s}{X_d + X_s} \cos \delta_s - \frac{U_s^2}{X_d + X_s} \approx \frac{U_s}{X_d + X_s} (E_q - U_s) \quad (1)$$

式中: E_q 为定子绕组内电势大小, U_s 为母线电压大小, δ_s 为两者对应相量的夹角, 由于调相机不发有功, $\delta_s \approx 0$; X_d 为调相机 d 轴电抗; X_s 为调相机与无穷大系统的联系电抗, $X_s = X_l + X_1$, X_l 、 X_1 分别为主变、线路电抗。

由式(1)可知, 正常工况下由于 $E_q \approx U_s$, $Q_{sc} \approx 0$ 。失磁故障发生后, E_q 会随着励磁电流 I_{fd} 的下降而减小。由于 $E_q < U_s$, 调相机无功功率 $Q_{sc} < 0$, 即失磁调相机会从系统中吸收无功功率。而调相机由于不发有功不带负载, 其制动转矩很小(仅为空载转矩), 且隐极调相机虽然在理论上有 $X_q \approx X_d$ (X_q 为 q 轴电抗), 但由于制造工艺、转子大小齿的差别, 调相机仍存在一定的静态反应转矩 M , 如式(2)所示。

$$M = \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\delta) \quad (2)$$

式中: U 为调相机机端电压有效值; δ 为 U 与 E_q 对应相量的夹角。该转矩足以克服空载制动转矩, 所以调相机在失磁后也能保持同步运行。因此, 发电机中常用的基于失磁后异步失稳特征的阻抗圆判据,

如静稳圆、异步圆等不再适用于调相机。

综上所述, 调相机发生失磁故障后, 其励磁电流下降并从系统中吸收无功功率。结合直流系统送受端的运行特点, 失磁调相机不受控的无功功率吸收作用可能会造成直流受端母线电压降低, 换相失败风险增大。但在对母线过电压更为敏感的直流送端, 吸收无功功率的失磁调相机对典型的高压暂态工况仍会有积极作用。

因此, 对于调相机的失磁保护, 首先要能准确识别失磁故障; 其次, 针对直流系统不同的运行工况, 失磁保护应采用不同的动作方式, 即在调相机的失磁故障对系统的安全运行造成威胁时尽快停机, 在失磁故障对系统仍有利的工况下进行告警提醒。

1.2 失磁调相机在系统暂态过程中的响应

由于失磁调相机在直流送端暂态过程中仍有积极作用, 有必要从理论层面进一步明确失磁调相机在系统暂态过程中的无功响应。即当调相机已经处于失磁状态下时, 在系统故障导致母线电压波动的情况下分析失磁调相机在系统暂态过程中的无功行为。

由于调相机不能持续提供有功支撑, 其瞬时输出无功功率可以近似为:

$$Q_{sc} = u_q i_d - u_d i_q \approx U_s \cos \delta_s i_d - U_s \sin \delta_s i_q \approx U_s i_d \quad (3)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为机端电压的 d 、 q 轴分量; i_d 、 i_q 分别为定子电流的 d 、 q 轴分量。由式(3)可知, 在系统母线电压变化前, 由于失磁调相机初始无功功率 $Q_0 < 0$, 定子电流 d 轴分量初值 $i_{d0} < 0$ 。

当系统发生故障或者受到扰动时, 母线电压有 ΔU_s 的变化 ($\Delta U_s = U_s - U_{s0}$, U_{s0} 、 U_s 分别为系统故障前、后的母线电压), 此时失磁调相机向系统注入无功功率的变化量 ΔQ_{sc} 为:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{sc} &= Q - Q_0 \approx U_s i_d - U_{s0} i_{d0} = \\ &= (U_{s0} + \Delta U_s)(i_{d0} + \Delta i_d) - U_{s0} i_{d0} = \\ &= (U_{s0} + \Delta U_s) \Delta i_d + \Delta U_s i_{d0} = U_s \Delta i_d + \Delta U_s i_{d0} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: Q 为调相机在系统故障后的无功功率; Δi_d 为调相机定子 d 轴电流变化量。由式(4)可知, 调相机无功功率变化量 ΔQ_{sc} 不仅与系统故障前状态 (i_{d0}) 有关, 也与系统故障程度 (ΔU_s)、故障后电压大小 (U_s) 及定子 d 轴电流变化量 Δi_d 有关。

由电机理论及相关研究可知^[15], 母线电压由 U_{s0} 变为 U_s 时, 相当于在机端突然加上了 ΔU_s 的电压, 故障后定子 d 轴电流增量 Δi_d 的表达式为:

$$\begin{aligned} \Delta i_d &= \Delta U_s \left[- \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} - \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} - \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{X_d} + \frac{\cos(\omega t + \delta_s)}{X_d''} e^{-\frac{t}{T_d''}} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中: X_d'' 为 d 轴次暂态电抗; X_d' 为 d 轴暂态电抗; T_d''

为 d 轴次暂态时间常数; T'_d 为 d 轴暂态时间常数; T_a 为反映定子 d 轴绕组周期分量衰减的时间常数; ω 为电角速度。

将式(5)代入式(4)后可得调相机无功功率变化量为:

$$\Delta Q_{sc} \approx -U_s \Delta U_s \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} + \frac{1}{X_d} - \frac{\cos(\omega t + \delta_s)}{X_d''} e^{-\frac{t}{T_a}} - \frac{i_{d0}}{U_s} \right] \quad (6)$$

文献[13]从式(6)出发对失磁调相机的完整无功行为进行了详细的讨论,由于篇幅有限相应内容本文不再赘述。本文仅以系统故障后第1个1/2周期时刻的值为例讨论失磁调相机在系统暂态期间的无功功率变化特征。将 $t=T/2$ (T 为交流周期)、 $\delta_s \approx 0$ 代入式(6),则此时的调相机无功功率变化量为:

$$\Delta Q_{sc} \approx -\frac{2U_s \Delta U_s}{X_d''} + \Delta U_s i_{d0} = -\Delta U_s \left(\frac{2U_s}{X_d''} - i_{d0} \right) \quad (7)$$

由于失磁调相机 $i_{d0} < 0$,由式(7)可以看出,系统电压变化后在第1个1/2周期时刻的 ΔQ_{sc} 与 ΔU_s 符号相反。在系统电压升高时,因 $\Delta U_s > 0$,故 $\Delta Q_{sc} < 0$;在系统电压下降时,因 $\Delta U_s < 0$,故 $\Delta Q_{sc} > 0$ 。即系统故障发生时,失磁调相机的瞬时无功响应仍与系统需求一致,失磁调相机仍有瞬时的无功调节能力。

从以上分析可以看出,失磁调相机不仅对母线过电压工况有利,在发生母线低电压故障时失磁调相机仍可能提供瞬时的无功支撑。这与通常认为的失磁调相机会从系统中吸收无功功率的现象并不冲突。因为失磁调相机提供的无功支撑发生在系统电压下降瞬间,而通常认为的失磁调相机吸收无功功率发生在系统稳态过程。在已有的相关分析中,失磁调相机的这种瞬时无功响应通常会被忽略。但考虑到系统换相失败故障发生的瞬时性,失磁调相机的这种短时无功支撑作用可能对抑制换相失败故障仍有一定的效果。文献[11-12]针对这一问题进行了详细的讨论及验证,证明了失磁调相机在母线电压下降时的瞬时无功支撑作用及其对换相失败的抑制效果。

1.3 已有的调相机失磁保护方案及不足

已有的调相机失磁保护主要从调相机发生失磁故障后无功功率反向、母线和机端电压降低、励磁电压下降等特征出发,采用两段式结构,保障设备及系统的安全运行。

1) 失磁保护 I 段。

当系统处于无功补偿不足的低电压工况时,失磁调相机的无功功率吸收作用会进一步恶化系统的运行状态。为了避免这一现象,失磁保护 I 段采用母线低电压、机端低电压及反向无功判据的

组合,延时1s动作于停机,动作逻辑如附录A图A1所示。

(1) 母线低电压和机端低电压判据。

母线或机端三相电压同时下降时对应低电压元件动作,判据如式(8)、(9)所示。

$$U_{pp} < 0.9U_{HN} \quad (8)$$

$$U_{tpp} < 0.9U_{tN} \quad (9)$$

式中: U_{pp} 和 U_{tpp} 分别为母线和机端相电压值; U_{HN} 和 U_{tN} 分别为正常运行时母线和机端相电压的额定值。

(2) I 段反向无功判据。

当调相机吸收无功功率时,反向无功元件动作,I 段反向无功判据如式(10)所示。

$$Q_{sc} < -0.11Q_n \quad (10)$$

式中: Q_n 为调相机的额定容量。

2) 失磁保护 II 段。

失磁保护 II 段主要针对调相机的全失磁故障,动作逻辑如附录A图A2所示。采用励磁低电压及反向无功判据判断是否发生失磁故障,采用母线高电压判据选择保护动作方式,并延时2s动作。失磁判据被满足后,当母线高电压判据也被满足时动作于告警,否则动作于停机。

(1) 励磁低电压判据。

当励磁电压下降时,励磁低电压元件动作,判据如式(11)所示。

$$U_f < 0.8U_{lp} \quad (11)$$

式中: U_f 为励磁电压值; U_{lp} 为调相机深度进相时的励磁电压。该判据的定值不确定,可根据现场实际需求进行开放整定。

(2) II 段反向无功判据。

当调相机吸收无功功率且其运行超过允许的最大进相深度时,II 段反向无功元件动作,判据为:

$$Q_{sc} < 1.1Q_{lp} \quad (12)$$

式中: Q_{lp} 为调相机深度进相运行时的反向无功功率。该判据的定值不确定,可根据现场实际需求进行开放整定。

(3) 母线高电压判据。

母线高电压元件在三相同时出现高电压时动作,判据如式(13)所示。

$$U_{pp} > 1.1U_{HN} \quad (13)$$

可以看出,无论是失磁保护 I 段还是 II 段,已有的失磁保护方案主要从无功反向特征出发,辅助以母线低电压、机端低电压及励磁低电压等判据识别失磁故障,综合考虑调相机的不同应用需求动作于停机或告警。但是,已有失磁保护方案仍存在一些不足,主要体现在以下方面。

1) 在失磁故障识别方面,由于正常调相机在进相运行时也会吸收无功功率,已有的失磁保护方案

需同时结合调相机无功功率反向与系统(或机端)低电压特征,从失磁故障后果的角度识别失磁故障(I段),或是由进相深度来识别调相机的全失磁故障(II段)。然而,仅依赖于故障后果或者深度进相的特征,势必会导致已有失磁保护方案在失磁故障后果不明显或是进相深度不够的工况下无法准确检测出故障。事实上,故障后果(即系统运行状态量)更适用于对保护动作方式进行选择,而失磁故障的识别则应从故障后调相机自身参数的变化出发寻找更为典型的失磁特征,尽可能地避免对系统运行状态的依赖以保证保护的灵敏性。

2)在保护动作方式上,已有的失磁保护方案虽然计及失磁调相机对系统不同工况的影响而采用了告警及停机2种动作方式,但并没有考虑到1.2节所述的失磁调相机在系统电压降低瞬间的无功支撑作用(此时失磁调相机对抑制换相失败仍有利)。此外,现场资料表明调相机自身具有一定的零励磁运行能力^[15]。因此充分考虑失磁调相机在系统低电压暂态过程及系统过电压工况下的积极作用,失磁保护方案的动作方式也需要被进一步优化。

2 基于励磁电流差异的调相机失磁保护方案

2.1 调相机失磁过程及特征的进一步分析

调相机失磁故障检测的难点在于区分失磁状态与正常进相状态。为了得到更典型的失磁特征,需要对调相机的失磁过程进行更加深入的分析。图2为调相机励磁系统的等效物理模型。图中, U_{fd} 为等效励磁电源两端电压的大小; E_{fd} 为励磁绕组两端实际电压的大小; I_e 为励磁电源输出电流的大小,其可直接测量,记为测量励磁电流; I_{fd} 为与实际励磁磁动势对应的励磁电流的大小,其在实际工程中无法直接测量,记为实际励磁电流的大小; r_{fd} 为励磁回路等效电阻; Z_L 为调相机失磁后引入回路的等效阻抗; K_1 、 K_2 为失磁故障发生时的等效开关。正常运行时 K_1 闭合、 K_2 打开,励磁回路为图2中的回路 A_1 ,此时励磁电源与励磁绕组串联,励磁电源输出的测量励磁电流 I_e 与励磁磁动势对应的实际励磁电流 I_{fd} 大小相等,即正常运行时有 $I_e = I_{fd}$ 。

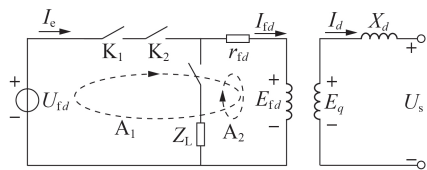


图2 调相机励磁回路等效物理模型

Fig.2 Physical model of SC's excitation winding

调相机失磁故障的原因包括励磁绕组短路、灭磁开关偷跳、励磁调节器故障、触发脉冲丢失等。但与励磁回路中的短路及开路引起的失磁故障相比,

如果不结合具体的失磁原因及相应的参数波形很难实现对由脉冲丢失、功放回路等励磁电源内部故障(尤其是轻微故障)的检测。由于基于参数平均值的已有保护也无法识别由部分触发脉冲丢失导致的失磁故障,文献[13]结合具体失磁原因及励磁电压波形的变化提出了优化解决方法,为此类失磁故障的检测提供了思路及方法。

因此,本文重点关注励磁回路中发生的短路及开路失磁故障,并以最为常见的励磁绕组短路及灭磁开关偷跳事件引发的失磁故障为例进行说明。

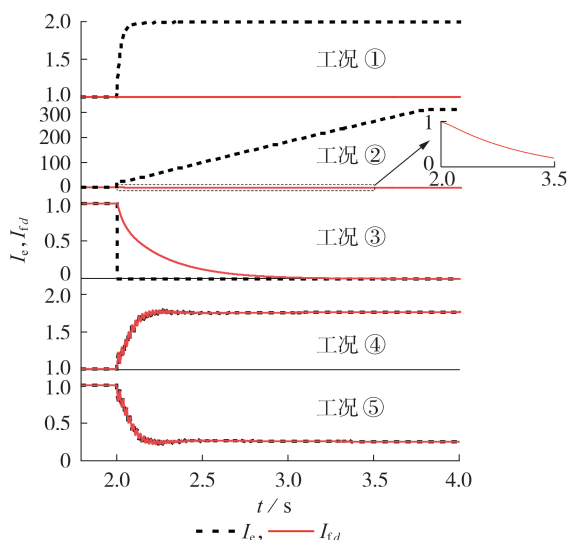
1)在励磁绕组短路故障引发的短路失磁故障下,开关 K_1 、 K_2 均闭合。其中,短路部分失磁情况下 $Z_L \neq 0$ (具体大小与失磁严重程度有关);短路全失磁情况下 $Z_L \approx 0$ 。

2)在灭磁开关偷跳引起的开路失磁故障下, K_1 、 K_2 分别对应灭磁装置的断路器、灭磁开关,二者之间存在连锁逻辑,即开路失磁故障发生后 K_2 闭合同时 K_1 自动跳开。在此工况下 $Z_L = R_{de}$, R_{de} 为灭磁电阻, $R_{de} \approx 5r_{fd}$ 。

由图2可见,无论是励磁绕组短路故障引发的短路失磁故障(短路部分失磁及全失磁故障)还是开路失磁故障,故障后励磁绕组又形成了回路 A_2 ,励磁电源与励磁绕组不再是简单的串联结构。由于回路结构改变,励磁电源输出的测量励磁电流与励磁绕组中的实际励磁电流不再相等,即 $I_e \neq I_{fd}$ 。

为了验证上述分析结果,在PSCAD中建立如图1所示的调相机单机无穷大系统进行仿真,具体仿真设置详见附录B。在2 s时分别设置以下5种调相机工况:①励磁绕组短路故障引发的短路部分失磁故障,本文以一半的励磁绕组短路为例,具体仿真设置见附录B中的B1部分;②励磁绕组短路故障引发的短路全失磁故障,将励磁绕组直接全部短路,具体设置见附录B中的B2部分;③灭磁开关偷跳引起的开路失磁故障,具体设置见附录B中的B3部分;④正常调相机的迟相工况,本文设置母线电压由额定值突变为0.9 p.u.;⑤正常调相机的进相工况,本文设置母线电压由额定值突变为1.1 p.u.。在上述5种工况下, I_e 、 I_{fd} 的仿真波形如图3所示。

由图3可知:在失磁工况①—③下, I_e 与 I_{fd} 的变化存在明显差异;在调相机正常迟相和进相运行工况下,系统电压分别降低和升高,虽然励磁电流会随系统电压的变化而变化,但 I_e 与 I_{fd} 的波形始终重合,两者大小相同。仿真结果验证了调相机失磁后测量励磁电流与实际励磁电流的值存在明显差异的故障特征。分析可知,在短路部分失磁工况下,由于部分励磁绕组发生短路故障,导致励磁磁动势下降,所以 $I_e > I_{fd}$;在短路全失磁工况下,由于励磁绕组直接全部短路, I_e 迅速增大而实际 I_{fd} 逐渐下降;在开路失磁

图3 I_e, I_{id} 在不同工况下的仿真波形Fig.3 Simulative waveforms of I_e and I_{id} in different conditions

工况下,由于回路开路, I_e 骤降为0, I_{id} 则由于灭磁电阻的存在逐渐减小;在正常调相机的迟相工况下,由于母线电压下降,调相机强励励磁电流迅速上升,但由于励磁电源与励磁绕组串联结构不变仍有 $I_e = I_{id}$;同理,在正常调相机的进相工况下,由于母线电压上升,调相机减励,励磁电流下降,但仍有 $I_e = I_{id}$ 。具体说明详见附录B。

2.2 调相机实际励磁电流的计算模型

在实际应用中,励磁磁动势对应的实际励磁电流 I_{id} 无法直接测量。为了实现对调相机失磁故障的识别,首先要建立实际励磁电流的计算模型。调相机的时空相矢量图如附录C图C1所示,在三相对称工况下已知机端相电压 U_{tp} 、相电流 I 、定子相电阻 R 和漏抗 X_s 等参数,通过计算得到合成基波磁动势 F_s 及电枢磁动势 F_a ,进一步求得励磁基波磁动势 F_{f1} 的大小,从而计算得到实际励磁电流值。由于计算过程中采用受饱和和影响较小的漏抗及实测得到的空载特性曲线等,且调相机在正常运行(非强励状态下)时励磁电流较小,磁路一般不饱和,所以下文将忽略饱和的影响,具体计算过程如下。

单相气隙电动势 E_s 可以表示为:

$$E_s = U_{tp} + I(R + jX_s) \quad (14)$$

对于一台具体的调相机,单相气隙电动势 E_s 对应的转子阶梯波磁动势的大小 F 可由调相机的空载特性曲线(如附录C图C2所示)获得。则 E_s 对应的合成基波磁动势 F_s 的大小 F_s 为:

$$F_s = k_f F \quad (15)$$

式中: k_f 为励磁磁动势波形因数。在时空相矢量图中, F_s 超前 E_s 90°。

电枢磁动势 F_a 与 I 方向相同,其大小 F_a 可以表

示为:

$$F_a = 1.35 \frac{IN_1}{p} k_{dp1} \quad (16)$$

式中: N_1 为定子绕组每相串联匝数; k_{dp1} 为定子基波绕组因数; p 为极对数。

则调相机的实际励磁电流大小的计算值 I_{fc} 为:

$$I_{fc} = \frac{2F_{f1}}{k_f N_f} = \frac{2|F_s - F_a|}{k_f N_f} \quad (17)$$

式中: $F_{f1} = |F_s - F_a|$,为调相机的励磁磁动势基波分量大小; N_f 为1对极下励磁绕组串联匝数。

由此,基于机端电压、电流即可实现对调相机实际励磁电流的实时计算。需要注意的是,由于计算模型基于定子侧参数且考虑饱和对参数的影响, I_{fc} 与 I_{id} 不可避免地存在一定的误差,即 $I_{fc} \approx I_{id}$ 。在稳态工况下该误差很小,而在变化剧烈的暂态过程中该误差将会增大,但随着暂态过程的迅速衰减,该误差也会迅速减小至稳态水平。通过合理整定保护定值及延时可以避免该误差的影响,具体在2.3节进行讨论。

2.3 失磁保护方案

针对已有调相机失磁保护方案的不足,同时为了避免调相机初始励磁状态的影响,本文基于上文的研究提出一种基于励磁电流差异特征的失磁判据,如式(18)所示。

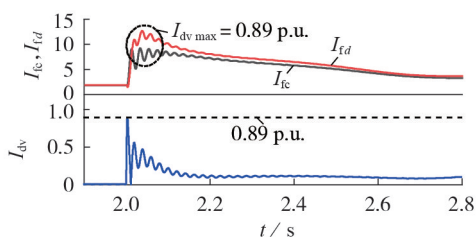
$$I_{dv} = |(I_e - I_{id})/I_{id}| \approx |(I_e - I_{fc})/I_{fc}| > S_{TH1} \quad (18)$$

式中: I_{dv} 为构建的失磁特征量; S_{TH1} 为失磁判据定值。

失磁保护延时20 ms动作于告警。正常情况下,由于测量励磁电流与实际励磁大小相同,二者与计算励磁电流大小也基本相等,即 $I_e = I_{id} \approx I_{fc}$,此时 $I_{dv} \approx 0$;开路失磁故障发生后测量励磁电流瞬间减小到0,即 $I_e = 0$,相应的 $I_{dv} \approx 1$;短路失磁故障发生后测量励磁电流瞬间增大,远大于实际励磁电流与计算励磁电流值,即 $I_e \gg I_{id} \approx I_{fc}$,相应的 I_{dv} 的值很大(远大于1);短路部分失磁故障发生时 $I_e > I_{id} \approx I_{fc}$,相应的 $I_{dv} > 0$,具体数值与故障严重程度有关。可以看出 I_{dv} 在失磁工况与正常工况下存在明显差异,通过合理设置定值即可进行失磁故障的检测。

下面讨论失磁保护判据定值的选取。由于在实际计算过程中计算值 I_{fc} 与实际值 I_{id} 存在一定的误差,从而导致正常运行时 I_{dv} 虽然很接近于0但不等于0,为了避免失磁保护误动,定值 S_{TH1} 的选择必须考虑正常调相机在各工况下的 I_{dv} 的最大值。为了获得这一最大的误差值,设置正常调相机机端2 s时发生三相金属性接地短路的极端工况,该工况下 I_{id} 、 I_{fc} 及 I_{dv} 的波形如图4所示。

由图4可以看出,在机端电压变化瞬间 I_{fc} 与 I_{id} 之间的误差最大,随着暂态过程的衰减,该误差逐渐

图4 在极端工况下 I_d 、 I_{dc} 及 I_{dv} 的波形Fig.4 Waveforms of I_d , I_{dc} and I_{dv} in extreme condition

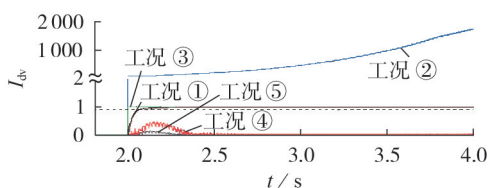
减小,与2.2节中的分析一致;在该极端暂态过程中, I_{dv} 在短路瞬间达到最大值0.89 p.u.,随后迅速衰减,衰减后始终小于0.2 p.u.。为了保证失磁保护的可靠性及灵敏性,选择 $S_{TH1}=0.9$ p.u.作为保护定值。同时,为了避免系统暂态过程及测量采样等环节带来的瞬时干扰,对失磁保护设置20 ms延时。

需要注意的是,由于本文的励磁电流计算模型基于三相对称工况,在不对称工况下会存在较大的计算误差。因此需要设置负序闭锁元件,元件判据如式(19)所示。

$$U_2 > 0.05 U_N \quad (19)$$

式中: U_2 为机端负序电压值; U_N 为机端线电压额定值。当不对称故障发生后,负序闭锁元件动作以避免因计算误差引起失磁保护误动。

进一步地,对比 I_{dv} 在2.1节设置的工况①—⑤下的波形,结果见图5。由图可见,失磁与正常调节工况下的 I_{dv} 大小及变化趋势区别明显,通过设置合理的定值及延时可有效识别调相机失磁故障。

图5 各工况下的 I_{dv} 波形Fig.5 Waveforms of I_{dv} in different conditions

考虑失磁调相机在系统稳态时仍会吸收无功功率,增加系统低电压、机端低电压判据如式(20)所示。

$$U_{pp} < KU_{HN} \text{ 或 } U_{tp} < KU_{tN} \quad (20)$$

式中: K 为低电压元件动作的可靠系数,一般取为0.8~0.9。由于送受端对低电压的敏感程度不同,在送受端的失磁保护配置中可对 K 取不同的值,如在受端取0.9、送端取0.8。若失磁判据及低电压判据同时被满足,则失磁保护再延时3 ms动作于切除失磁调相机,从而充分利用失磁调相机的瞬间无功支撑作用,同时避免其在系统低电压的稳态过程中吸收无功功率。

综上,失磁保护新方案的逻辑如图6所示。本

文失磁保护方案仍采用2种动作方式,在负序闭锁元件不动作的前提下,首先检测调相机的失磁故障,满足失磁条件后动作于告警信号,同时启动低电压元件检测系统运行状态,若调相机失磁且系统处于低电压工况下,则快速切机,最大限度地发挥调相机的无功支撑作用。需要注意的是,本文的失磁保护方案的动作方式主要从系统稳定运行的角度出发,在实际现场应用时可以进一步结合设备自身安全运行需求调整保护动作方式。

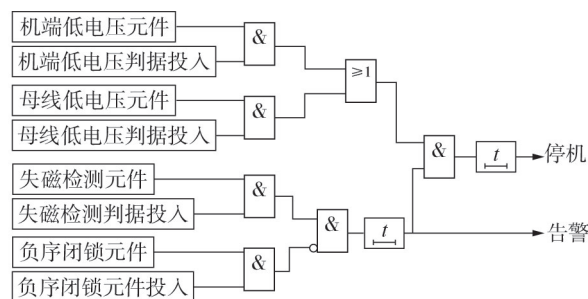


图6 本文失磁保护方案逻辑

Fig.6 Logic of proposed excitation loss protection scheme

3 仿真验证

为了验证本文失磁保护方案在实际应用中的有效性,本文在PSCAD/EMTDC中建立了基于锡盟—泰州实际工程的直流线路模型,系统模型介绍及详细参数见附录D。在受端500 kV换流母线处接入一台调相机,以此为例对比分析在各工况下已有失磁保护方案及本文失磁保护方案在失磁故障的识别及动作方式对系统的影响等方面的表现。在仿真中,已有失磁保护Ⅱ段无功功率定值取为-0.55 p.u.,励磁电压定值取为0.25 p.u.;本文失磁保护的调相机失磁定值及受端低电压动作可靠系数均取为0.9。

1) 系统稳态条件下的短路部分失磁故障仿真。

在正常运行的稳态系统中,设置调相机在2 s时发生短路部分失磁故障(仍以一般的励磁绕组短路为例,具体仿真设置见附录B)。已有失磁保护方案的特征量,即调相机无功功率、励磁电压、母线相电压及机端相电压和本文失磁保护方案的特征量,即 I_{dv} 、母线相电压及机端相电压波形如图7所示。由图可见,短路部分失磁故障发生后,调相机输出的无功功率有一定程度的下降,但始终大于已有失磁保护Ⅰ段定值-0.11 p.u.、Ⅱ段定值-0.55 p.u.;虽然失磁故障造成励磁电压、母线相电压及机端相电压在小范围内波动,但三者始终大于相应的保护定值,不满足失磁保护动作条件。因此,已有失磁保护方案无法检测到短路部分失磁故障。但由图7中的 I_{dv} 波形可以看出,故障前 I_{dv} 小于定值,短路部分失磁故障发生后, I_{dv} 大于保护定值,满足动作条件,可知本文失

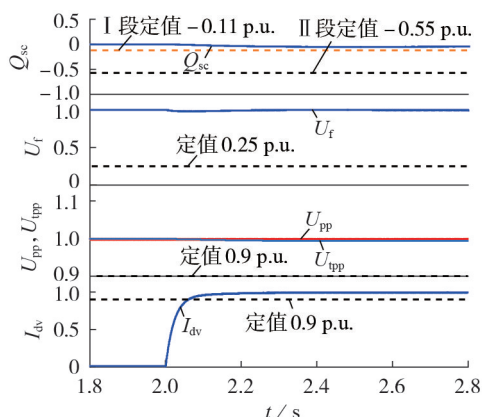


图7 系统稳态条件下发生短路部分失磁故障时, 2种失磁保护方案的特征量

Fig.7 Feature quantities of two excitation loss protection schemes under partial excitation loss caused by short circuit fault, in steady state

磁保护方案可以有效检测到短路部分失磁故障。

2) 系统稳态条件下的全失磁故障仿真。

以开路失磁故障为例,对调相机在系统稳态时发生全失磁故障进行仿真,故障时刻为2 s,则已有失磁保护方案和本文失磁保护方案的特征量见图8。

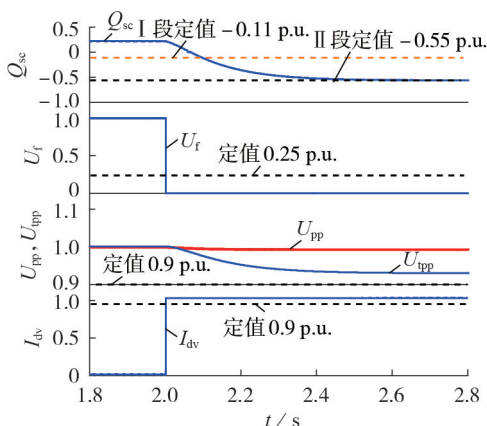


图8 系统稳态条件下发生全失磁故障时, 2种失磁保护方案的特征量

Fig.8 Feature quantities of two excitation loss protection schemes under total excitation loss, in steady state

由图8可以看出,已有失磁保护方案与本文失磁保护方案均能检测到全失磁故障的发生。在已有失磁保护方案中,失磁调相机的无功功率小于保护I、II段定值,I、II段反向无功元件均可动作;励磁电压小于保护II段定值,励磁低电压元件能可靠动作;而由于母线相电压及机端相电压始终大于保护I段低电压定值0.9 p.u.且母线电压值小于保护II段高电压定值1.1 p.u.,已有失磁保护I段不动作,II段在故障发生后0.5 s(即2.5 s)检测到失磁故障,延时2 s后动作于停机。而在本文失磁保护方案中,

I_{dv} 几乎在失磁故障发生的瞬间就达到了保护定值,而由于母线相电压及机端相电压始终大于0.9 p.u.,保护延时20 ms动作于告警。事实上,对比失磁前、后母线相电压的变化,可以看出调相机的失磁故障不会对稳态运行的系统造成明显的影响。这主要是因为与系统容量相比,调相机的容量十分有限。以锡盟—泰州工程为例,正常运行时受端所需无功功率为2700 Mvar,滤波器的容量为3100 Mvar,系统正常运行时一组滤波器处于备用状态,系统静止无功设备容量充足。单台调相机的最大进相深度为-150 Mvar,失磁调相机形成的无功缺额完全可以通过投入备用滤波器小组进行补偿。因此,失磁故障对稳态运行的系统的影响将会很小。调相机失磁保护在稳态运行的系统中的动作方式应主要取决于失磁调相机在系统暂态过程中的表现。

3) 系统暂态条件下的仿真。

为对比系统暂态条件下已有失磁保护和本文失磁保护方案的表现,在仿真2)的基础上,设置受端500 kV交流系统在不同时刻、不同位置发生对称故障进行暂态过程仿真。

(1)案例1:系统稳态条件下,2 s时调相机发生开路全失磁故障,3 s时受端500 kV交流系统距换流母线1.2 km处发生三相故障,此时已有失磁保护方案还没有来得及切除失磁调相机(切除时刻应为4.5 s)。已有失磁保护方案和本文失磁保护方案的特征量如图9所示。

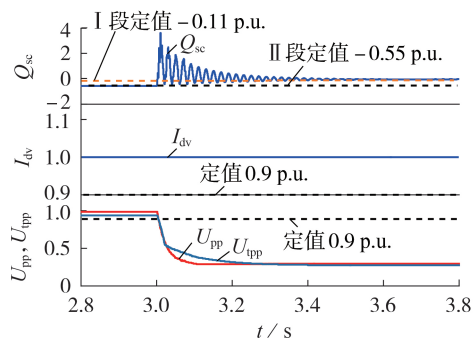


图9 案例1中2种失磁保护方案的特征量

Fig.9 Feature quantities of two excitation loss protection schemes in Case 1

由图9可见,失磁调相机在系统电压跌落后存在正向的无功响应,与1.2节的分析结果一致,此时基于无功反向特征的已有失磁保护I、II段均不能判别出调相机处于失磁状态。而本文失磁保护方案的特征量 I_{dv} 在调相机失磁后的系统暂态过程中也始终大于定值0.9 p.u.,若当系统故障发生后,母线或机端低电压动作条件被满足,则失磁保护迅速动作切除失磁调相机。

(2)案例2:系统稳态条件下,2 s时调相机发生

开路全失磁故障,5 s时受端交流系统在距 500 kV 换流母线 67 km 处发生三相故障。在系统 5 s 发生故障前,已有失磁保护Ⅱ段经过 2 s 的延时已经切除了失磁调相机(切除时刻为 4.5 s),而本文失磁保护方案中失磁调相机仍与系统相连。系统暂态过程中,本文失磁保护方案的特征量波形如图 10 所示。

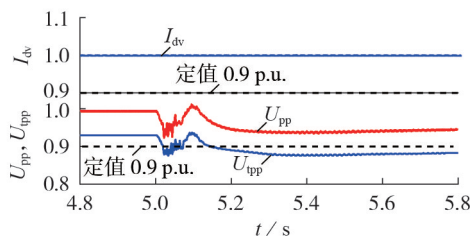
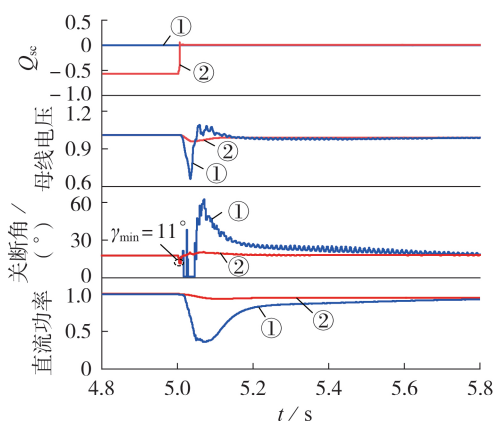


图 10 案例 2 中本文失磁保护方案的特征量

Fig.10 Feature quantities of proposed excitation loss protection scheme in Case 2

由图 10 可以看出,在案例 2 中 I_{dv} 始终大于定值,但在系统故障后机端低电压元件才满足动作条件,本文失磁保护方案在系统故障发生后才切除失磁调相机。对比已有保护方案中系统故障前已经切除失磁调相机和本文失磁保护方案中系统故障后再切除失磁调相机的动作方式,相应的调相机与系统交换的无功功率、受端母线电压及系统响应(直流功率及关断角)波形如图 11 所示。



① 已有失磁保护方案, ② 本文失磁保护方案

图 11 调相机及系统响应

Fig.11 Responses of synchronous condenser and system

由图 11 可以看出,在已有失磁保护方案中,由于已经切除了调相机,暂态期间调相机与系统的无功交换为 0,系统在交流故障后又发生了换相失败故障,关断角减小到 0°。而在本文失磁保护方案中,在系统故障瞬间,失磁调相机仍向系统提供了无功支撑,且随后失磁调相机被迅速切除,这一瞬间的正向无功响应减缓了系统故障初期母线电压的下降速度,使得在同样的交流故障水平下,直流系统没有发生换相失败,暂态期间的关断角最小值 $\gamma_{\min}=11^\circ$,且

直流功率波形得到了很大的改善。由此可见,与已有失磁保护方案相比,本文失磁保护方案的动作方式更有利于系统暂态稳定。

4 结论

本文通过对调相机失磁故障特征及失磁调相机在暂态过程中无功响应的分析,指出了基于无功反向特征的已有失磁保护方案不能够准确识别调相机的失磁故障,且在非过电压工况下直接切除失磁调相机的动作方式不利于抑制系统换相失败故障。通过分析调相机失磁过程,得出了励磁电流测量值及计算值存在明显差异的失磁特征。基于机端电压、电流等参数,建立了调相机实际励磁电流的计算模型。在此基础上,构建了基于励磁电流差异特征的失磁保护判据,提出了新型的失磁保护方案。最后,在 PSCAD / EMTDC 中建立了基于实际工程的直流系统及调相机模型,通过仿真对比已有失磁保护方案与本文失磁保护方案的表现,验证了本文失磁保护方案能更为准确地检测调相机失磁故障,并且其动作方式更有利于抑制系统换相失败故障。本文的研究可为调相机在直流系统中的应用提供技术支撑。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 温家良,吴锐,彭畅,等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(13):7-12,185.
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13):7-12, 185.
- [2] 陈争光,詹荣荣,李岩军,等. 分布式电源系统继电保护装置检测技术的研究[J]. 电网技术,2015,39(4):1115-1120.
CHEN Zhengguang, ZHAN Rongrong, LI Yanjun, et al. Research on testing technology of relay protection for distributed power system[J]. Power System Technology, 2015, 39(4):1115-1120.
- [3] 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.
- [4] 索之闻,刘建琴,蒋维勇,等. 大规模新能源直流外送系统调相机配置研究[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):124-129.
SUO Zhiwen, LIU Jianqin, JIANG Weiyong, et al. Research on synchronous condenser configuration of large-scale renewable energy DC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9):124-129.
- [5] 黄华,潘学萍,李乐,等. 并网大容量调相机对交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.
- [6] MANKOUR M, KHIAT M, GHOMRI L, et al. Modeling and

- real time simulation of an HVDC inverter feeding a weak AC system based on commutation failure study[J]. ISA Transactions, 2018, 77: 222-230.
- [7] 周全仁. 调相机的无励磁运行方式[J]. 电力技术, 1980(11): 38-43.
ZHOU Quanren. The non-excitation operation mode of synchronous condenser[J]. Electric Power, 1980(11): 38-43.
- [8] 林其煌. 调相机失磁保护的分析和研究[J]. 福建电力与电工, 1994, 14(1): 1-5.
- [9] 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.
- [10] 桑建斌, 包明磊, 李玉平, 等. 300 Mvar调相机继电保护的分析和改进[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(6): 217-223.
SANG Jianbin, BAO Minglei, LI Yuping, et al. Analysis and improvement of relay protection of 300 Mvar synchronous condenser[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 217-223.
- [11] GUO Zhilin, HAO Liangliang, WU Junyong, et al. Synchronous condenser's loss of excitation and its impact on the performance of UHVDC[J]. Energies, 2020, 13(8): 1-16.
- [12] 郭智琳, 郝亮亮, 陈争光, 等. 调相机失磁特性及其对直流系统的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 130-137.
GUO Zhilin, HAO Liangliang, CHEN Zhengguang, et al. Analysis on excitation loss characteristics of synchronous condenser and its influence on direct current system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 130-137.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 李志强, 蒋维勇, 王彦滨, 等. 大容量新型调相机关键技术参数及其优化设计[J]. 大电机技术, 2017(4): 15-22.
LI Zhiqiang, JIANG Weiyong, WANG Yanbin, et al. Key technical parameters and optimal design of new types of large capacity synchronous condenser[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2017(4): 15-22.

作者简介:



郭智琳

郭智琳(1994—),女,河南焦作人,博士研究生,研究方向为调相机在传统直流中的应用及其失磁故障与保护(E-mail: 18117006@bjtu.edu.cn);

郝亮亮(1985—),男,北京人,副教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统主设备故障分析及保护、直流输电控制与保护、励磁控制(E-mail: haoll07@mails.tsinghua.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Excitation loss protection scheme based on excitation current difference for synchronous condenser

GUO Zhilin¹, HAO Liangliang¹, CAO Hong², WANG Xingguo²

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Firstly, behavior of SC(Synchronous Condenser) during the excitation loss and the transient response of SC with excitation loss fault are analyzed. The results indicate that the faulty SC still has certain reactive power response to system voltage variation. On this basis, the defects of the existing excitation loss protection scheme based on the reverse reactive power characteristic in the fault detection and the protection operation are analyzed. To further optimize the excitation loss protection of SC, the excitation loss process of SC is deeply analyzed, and the fault characteristic that the measured excitation current produced by the excitation source is obviously different from the actual excitation current corresponding to the actual excitation magnetomotive force is obtained. Then, the calculation model of the actual excitation current is established, which solves the problem that the actual excitation current cannot be measured directly. Then, the excitation loss criterion based on the excitation current difference is proposed, and the corresponding protection scheme with the improvement of the operation mode is presented. Finally, the direct current power transmission model based on the practical project equipped with SC is built in PSCAD, the effectiveness of the proposed excitation loss protection scheme is verified by comparing with the effects of the existing excitation loss protection scheme.

Key words: synchronous condenser; HVDC power transmission; dynamic reactive power compensation; excitation loss protection; commutation failure

附录 A 已有失磁保护逻辑

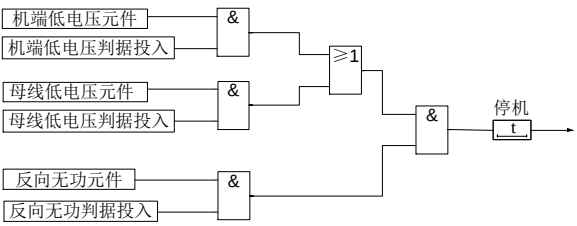


图 A1 已有失磁保护 I 段逻辑

Fig.A1 Logic of section I of existing excitation loss protection

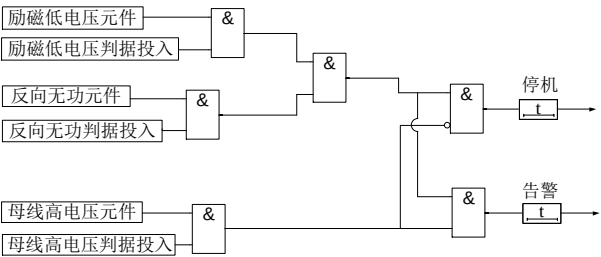


图 A2 已有失磁保护 II 段逻辑

Fig.A2 Logic of section II of existing excitation loss protection

附录 B 调相机失磁仿真设置说明

B1 调相机短路部分失磁仿真设置说明。

由于 PSCAD 仿真软件的限制，电机模型中的励磁回路结构无法直接更改。本文采用励磁回路接入外部故障支路的方法进行励磁绕组部分短路的近似等效仿真。

图 B1 为实际励磁绕组部分短路时的物理模型。当故障发生时，开关 K 由打开跳至闭合状态，导致励磁绕组匝数由 N 变为 N_f ($N_f < N$)。此时虽然励磁绕组中流过的励磁电流大小仍为测量励磁电流 I_e ，但其对应生成的磁动势大小则由 $F_0 = NI_e$ 变为 $F_f = N_f I_e$ 。因此短路部分失磁故障发生后会导致励磁磁动势减小，即 $F_f < F_0$ 。

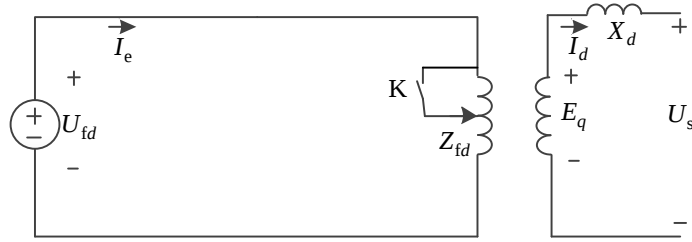


图 B1 实际工况下调相机部分励磁绕组短路时的物理模型

Fig.B1 Physical model of synchronous condenser under partial excitation loss caused by short circuit in engineering

而 PSCAD 中调相机模型的励磁回路是固定在模型内部的(如图 B2 所示)，即向电机模型输入励磁电压的值(图 B2 中的 E_f)模型自动响应生成励磁电流(图 B2 中的 I_f)，而励磁绕组匝数 N 无法直接修改。因此无法通过直接减小励磁绕组匝数的方式进行短路部分失磁工况的仿真。为了解决这一问题，在 PSCAD 模型中搭建了励磁绕组等效回路，并在发生故障时引入故障支路用于模拟短路部分失磁后励磁磁动势的减小。图 B3 为 PSCAD 中搭建的等效励磁回路结构。其中 U_{fd} 与 I_{fd} 为受控电压源和受控电流源的输入量(分别对应于图 B2 中的 E_f 和 I_f)。在正常运行工况下，开关 K_2 打开， A_1 即为等效的励磁回路。而当短路部分失磁故障发生时，开关 K_2 闭合，引入故障阻抗 Z_L 所在支路，使得实际生成励磁磁场的励磁电流 I_{fd} 小于测量励磁电流 I_e ，则故障后的励磁磁场变为 $F'_f = NI_{fd}$ 。由于 $I_{fd} < I_e$ ，则有 $F'_f < F_0$ ，从而实现了在短路部分失磁故障发生后励磁磁动势的减小。通过改变 Z_L 的大小可以改变 I_{fd} 的值，从而影响故障后的励磁磁动势 F'_f 的大小，以此模拟不同程度的短路部分失磁故障。在本文的短路部分失磁故障仿真中，设置 $Z_f = Z_{fd}$ (Z_{fd} 为调相机励磁回路阻抗大小)，使得 $I_{fd} \approx 0.5I_e$ ， $F'_f \approx 0.5F_0$ ，近似模拟一半的励磁绕组发生短路故障。

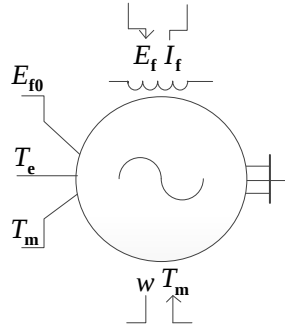


图 B2 PSCAD 中的电机模型

Fig.B2 Machine model in PSCAD

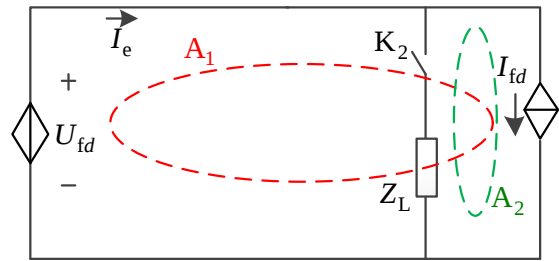


图 B3 仿真模型设置的等效失磁回路

Fig.B3 Equivalent excitation loss loop in simulation

B2 调相机短路全失磁仿真设置说明。

调相机短路全失磁时对应的物理绕组模型如图 B4 所示。正常运行时开关 K 打开，发生短路全失磁故障时开关 K 闭合，励磁绕组被完全短路。对应于短路全失磁故障的发生，励磁绕组两端电压瞬间变为 0。因此在 PSCAD 中模拟短路全失磁故障时直接输入电机模型的励磁电

压在故障瞬间变为 0 即可实现励磁绕组全部短路。

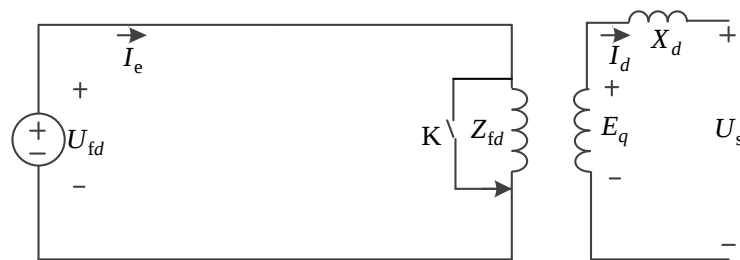


图 B4 调相机短路全失磁时的物理模型

Fig.B4 Physical model of synchronous condenser under total excitation loss caused by short circuit

B3 调相机开路失磁仿真设置说明。

在实际工程中调相机的开路失磁往往是由灭磁开关偷跳引起的，对应的实际物理模型如图 B5 所示。正常运行时开关 K_1 闭合、 K_2 打开。而当发生开路失磁时，灭磁开关 K_2 闭合，同时由于内部连锁逻辑， K_2 闭合的同时 K_1 打开。故障后励磁电流将在图 B5 中的回路 A_2 中衰减。由于灭磁电阻的存在回路时间常数较大，故障发生后励磁电流迅速衰减为 0。但由于 PSCAD 电机模型中励磁电流为输出量，无法直接对其进行修改。为了模拟开路失磁仿真，在故障瞬间设置输入调相机的励磁电压跳 0，同时修改励磁回路的次暂态时间常数使得励磁电流在故障后迅速下降（故障时的时间常数值使得励磁电流下降速度与实际现场实验数据保持一致），从而近似模拟调相机开路失磁故障的发生。

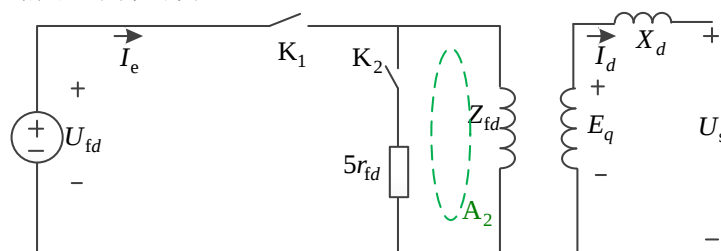


图 B5 调相机开路失磁时的物理模型

Fig.B5 Physical model of synchronous condenser with total open-circuit excitation loss

附录 C 调相机时空相量矢量关系及空载特性曲线

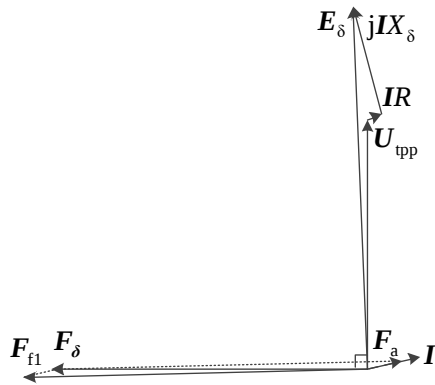


图 C1 调相机的时空相量图

Fig.C1 Space-time phase vector diagram of synchronous condenser

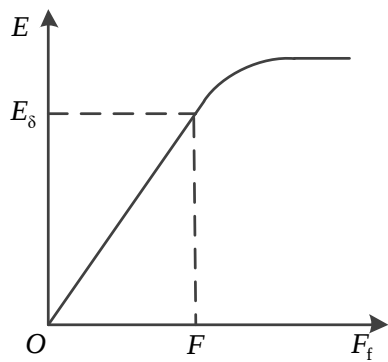


图 C2 调相机的空载特性曲线

Fig.C2 No-load characteristic curve of synchronous condenser