

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201172

面向大容量直流闭锁的暂态稳定紧急切机控制策略研究

相禹维, 王彤, 李聪聪, 王增平

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 在交直流混合系统中, 大容量高压直流线路闭锁造成的永久性功率冲击将引起送端交流系统机组不同程度的加速运动, 可能造成送端机组失步运行。主要对大容量直流输电线路闭锁后的切机策略展开研究。首先分析比较了直流闭锁故障与短时功率冲击对送端系统稳定性的不同影响, 提出了三角形近似法求取切机总量, 改善了控制总量预估的保守性。然后从减速能量角度定义切机灵敏度指标, 基于此形成切机比例上限约束下的切机量分配方案。在搭建的典型两区域交直流混合电网进行了仿真分析, 验证了所提方法的有效性。该方法能够充分发挥领先机群中高灵敏度机组对于暂态稳定恢复的影响, 可有效减少切机量, 降低暂态稳定控制代价。

关键词: 交直流混合系统; 直流闭锁; 送端系统稳定性; 减速能量; 切机策略

Strategy of emergency generator tripping control for transient stability after a large capacity HVDC blocking fault

XIANG Yuwei, WANG Tong, LI Congcong, WANG Zengping

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In an AC/DC hybrid power system, after the long-term power impact caused by large capacity High-Voltage Direct Current (HVDC) line blocking, the generators in the sending-end system will have different degrees of acceleration movement, and finally the generators at the sending-end may be out of step. This paper examines the generator tripping strategy after the HVDC line blocking fault. First, we analyze and compare the different effects on the stability of the sending-end system between the HVDC blocking fault and the short-term power impact, and then a triangle approximation method is proposed to estimate the generation capacity to be tripped. This establishes the conservative of calculated control variable. Then, the sensitivity of generator tripping is defined from the perspective of deceleration energy. Finally, considering the generator tripping ratio limitation, a scheme to allocate the generator tripping capacity is formed. Simulation and analysis of a typical two-area AC/DC hybrid power system are carried out to verify effectiveness of the proposed method. Using this method, the generators that have better capacity to enhance the need for transient stability to be considered as a priority. In this way the tripping amount and the control cost are effectively reduced.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51637005).

Key words: AC/DC hybrid power system; DC blocking; stability of sending-end system; deceleration energy; generator-tripping strategy

0 引言

我国的能源与负荷分布具有典型的区域不平衡性, 高压直流输电以其大容量、远距离等方面的输电优势在我国得到了快速发展^[1-6]。我国“三华”电

网中连于华中-华东之间的7回直流^[7], 大容量多直流的功率冲击将对华中-华东直流异步互联系统的安全稳定性产生显著的影响^[8]。电力系统的失稳事故可能引起工业和居民断电, 甚至可能导致电力系统崩溃, 给我国经济造成重大损失。因此故障发生后, 快速准确地对扰动影响进行评估, 并基于此给出及时有效的紧急控制措施具有重要意义^[9-10]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51637005)

暂态功角失稳时, 通常对送端系统进行切机控制以保证系统恢复稳定^[11]。切机控制不仅可以直接减少过剩的暂态动能, 更为重要的是可以改变系统的暂态动能分布, 有效降低系统中的暂态能量^[12-13]。紧急切机策略的制定主要是解决切机量的计算、切机顺序的确定以及切机量的分配等问题。

目前在确定故障后切机总量时, 主要采用能量函数法和扩展等面积法则。文献[14]根据修正能量函数的守恒性定义了不同切除量下的暂态稳定裕度, 通过插值法确定临界裕度下的切机总量; 文献[15]中分析了控制后相轨迹斜率变化特性, 得到控制量与相轨迹斜率变化特性的关系, 以常数近似的轨迹斜率得到实际控制量; 文献[16-17]中基于轨迹预测确定切机操作需补偿的能量, 并通过矩形近似法确定控制量。以上研究均是面向纯交流系统, 建立了交流线路故障引发系统暂态失稳的切机策略。而对于交直流混合系统, 在大容量直流线路发生闭锁故障后, 系统中暂态能量的传播与演化与上述有明显不同^[18], 面向该种特定扰动下的稳控措施的研究较少。

在计算出对应等值系统的总切机量后, 根据单一性指标, 即依据电气距离确定机组切除顺序^[19]或机组出力情况分配切机量^[20]; 为提高评价方法的准确性, 进一步提出复合型指标指导切机^[21]。文献[22]中基于功率转移分布因子的切机分摊方法, 对每次计算得到的机组动能增量进行排序, 制定基于发电机响应的最新切机序位表; 文献[23]综合考虑发电机的暂态动能和功角的影响, 选择总容量大于且最接近于控制总量的切机地点排序表中的前几台发电机作为最终的切机控制策略。这些方法丰富了暂态稳定切机量分配方法的研究, 但由于未能从暂态能量的角度描述切机控制措施的本质作用, 评价标准不具有普适性, 因此, 建立更为广泛的控制措施评价标准需要进一步研究。

本文主要面向大容量直流输电线路闭锁后的切机策略展开研究。首先, 分析了直流闭锁故障与短时功率冲击对送端系统暂态稳定性的不同影响, 面向直流闭锁故障, 提出了三角形近似求取切机控制总量的方法; 然后, 依据相同控制量下减速能量的变化表征切机灵敏度指标, 基于此形成切机比例上限约束下的切机量分配方案; 最后, 在搭建的典型两区域交直流互联电网进行了仿真分析, 结果验证了本文方法的有效性。

1 送端系统等值模型

交直流混合系统中的大容量直流输电线路发生直流闭锁后, 大量不平衡功率积累在送端, 系统的失稳, 一般首先是在 2 个机群间失去同步^[24], 依据受扰轨迹将送端机组分为领先机群 S 和剩余机群 A, 基于此获得送端系统等值模型^[25], 如图 1 所示。

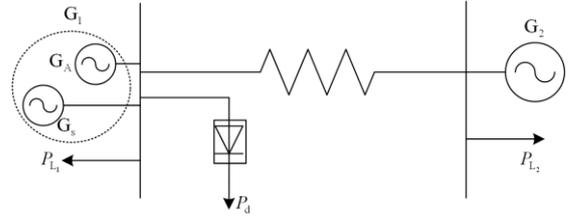


图 1 送端系统等值模型

Fig. 1 Equivalent model of sending-end system

为定量分析系统稳定性, 进一步等效成单机模型。令 $\delta = \delta_1 - \delta_2$, 此时等效发电机的转子运动方程如式(1)。

$$\frac{d\delta^2}{dt^2} = \left(\frac{P_{m1}}{M_1} - \frac{P_{m2}}{M_2} \right) - \left(\frac{P_{L1}}{M_1} - \frac{P_{L2}}{M_2} \right) - \frac{P_d}{M_1} - P_{e\max} \sin \delta \quad (1)$$

式中: P_{m1} 、 P_{m2} 为等值发电机的机械功率; P_{L1} 、 P_{L2} 为等效负荷功率; P_d 为直流输电系统外送功率; $P_{e\max}$ 为等值电磁功率最大值。令 P'_m 为等值后单机系统等效机械功率, 如式(2)。

$$P'_m = \left(\frac{P_{m1}}{M_1} - \frac{P_{m2}}{M_2} \right) - \left(\frac{P_{L1}}{M_1} - \frac{P_{L2}}{M_2} \right) - \frac{P_d}{M_2} \quad (2)$$

为了对比 $N-1$ 型故障和直流闭锁故障对送端系统稳定性的影响, 分别绘出两种故障下的功率特性曲线, 如图 2 所示。图 2(a)所示送端系统发生 $N-1$ 型故障时, 送端系统受到短时不平衡功率冲击, 故障过程中外界向该系统注入不平衡能量, 故障线路切除时刻, 能量达到最大值。此后, 全系统中的暂态能量进入守恒状态, 故障清除时刻系统的不平衡能量等于故障清除时转子所具有的修正暂态动能。故障后足够的减速能量使得系统不致越过不稳定平衡点进入失稳状态。

图 2(b)所示直流闭锁故障是长时的不平衡功率分配。假设稳态时故障直流输送功率为 ΔP_D , 直流闭锁后, 系统的等效机械功率瞬时上升 $\Delta P'_m$ 。

$$\Delta P'_m = P'_m + \frac{\Delta P_D}{M_2} \quad (3)$$

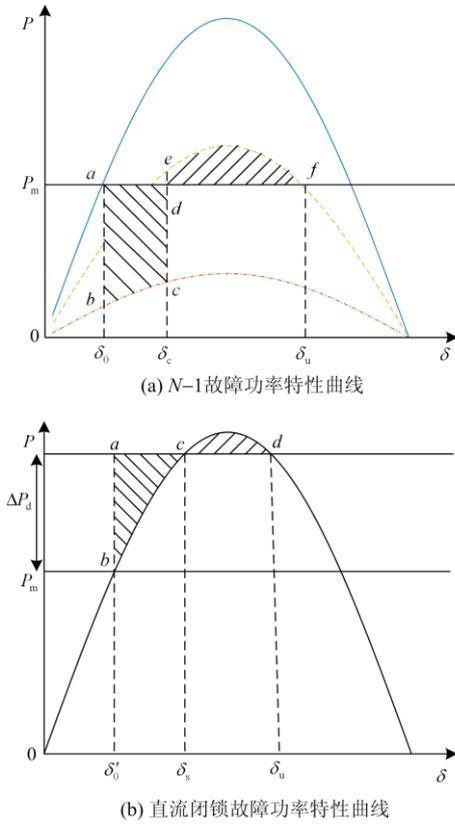


图2 功率特性曲线比较

Fig. 2 Comparison of power characteristic curves

不平衡功率带来系统加速能量的积累，无措施时最大加速能量在系统运行到c点时获得。其中， $\Delta P'_m$ 为直流闭锁后系统等效机械功率。在系统运行到 δ_u 点时，若加速能量仍未被完全消耗，则系统失稳。由式(3)可知，等效机械功率抬升幅度与故障直流输电系统稳态输送功率以及两群等值机械惯性时间常数有关。

2 直流闭锁后切机提高暂态稳定性分析

若受扰系统故障后失稳，假设采取切机措施使其恢复稳定。考虑故障信号以及切机命令传输的延时，从直流闭锁发生至相应的切机操作开始动作，系统中已经积累了大量的不平衡能量。

这里，为与仿真中大容量直流线路闭锁相对应，后文中故障后等效机械功率上升量也相应增大。图3为直流闭锁后切机功率特性曲线，当在超前机群中切除相应的机组后，等值于减少原动机功率，机械功率由 P'_m 下降 $\Delta P'_m$ 至新的运行点，因此，直流闭锁后切机将通过增大故障后系统减速面积来提高系统的暂态稳定性。

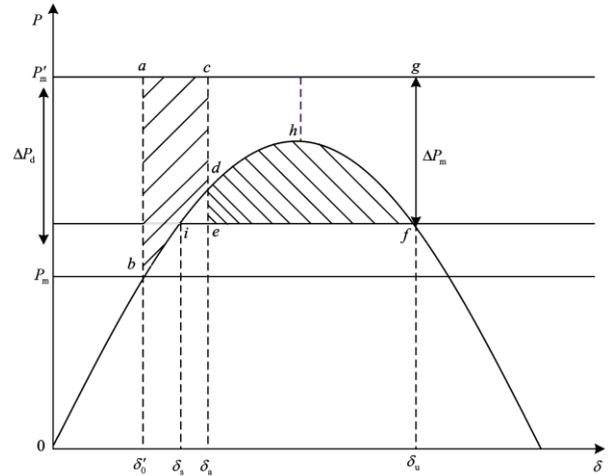


图3 直流闭锁后切机功率特性曲线

Fig. 3 Power characteristics curve of HVDC blocking fault

2.1 切机量的确定

直流闭锁后切机，在切机动作时间相同的前提下，信号传输的延迟以及切机动作迟滞引发的系统不平衡能量积累量相同，不同的切机命令通过影响减速能量的大小，进而影响故障后暂态稳定性的恢复。

假设故障发生时刻为 t_0 ，切机动作时间为 t_a ，切机动作前系统中不平衡能量的积累为

$$V_U = \int_{\delta_0}^{\delta_a} (P_m - P'_e) d\delta = \int_{t_0}^{t_a} (P_m - P'_e) \frac{d\delta}{dt} dt \quad (4)$$

式中： P'_e 为直流闭锁后对应的实际电磁功率曲线； δ_0 为故障发生时刻发电机功角； δ_a 为切机动作时刻的功角。

切机动作后，系统的最大减速能量为

$$V_D = \int_{\delta_a}^{\delta_u} (P''_e - P'_m) d\delta = \int_{\delta_a}^{\delta_u} [P''_e - (P_m - \Delta P'_m)] d\delta \quad (5)$$

式中： δ_u 为切机动作后的系统不稳定平衡点； P''_e 为故障切机后对应的等值电磁功率； P'_m 为切机后的等效机械功率； $\Delta P'_m$ 为切机量。

交直流混联系统不稳定平衡点的求取与交直流混联系统的潮流计算和时域仿真类似，即交流直流部分进行交替迭代求解。在形成交流部分动态方程组时，直流输电系统视作连于换流站母线的交流系统的“负荷”。当某直流因故障导致闭锁，直流系统经换流站母线向交流系统注入的功率突降为0。同时，切机动作会切除发电机的机械功率和转动惯量，导致主导不稳定平衡点UEP的变化。因此故障后需切机补偿的减速能量，如图3中区域 $dehf$ 所示，紧急切机后的临界稳定状态下，满足 $V_D = V_U$ 。相同的切机量，矩形近似^[26-27]认为产生的减速能量如矩形

区域 *cefg* 所示, 本文采用三角形面积近似法, 相同紧急控制措施后, 系统产生的减速能量如区域 *fih* 所示, 基于故障后各发电机电磁功率曲线和功角特性曲线, 以此作为基础数据, 参与切机量的求解。考虑实际系统中的切机并不是单纯减小原动机出力, 切机后电源阻抗的改变会降低功率特性曲线, 采用文中近似方法得到的结果理论上偏保守, 符合稳定控制要求。近似三角形面积与电磁曲线围成的面积的差值, 可以降低计算结果的保守性, 得到更为可靠的切机量计算结果。

具体过程展开如下:

(1) 基于故障后各发电机电磁功率数据和功角信息, 经等值处理获得故障后功率特性曲线 $P_e = P_e(\delta)$, 初步得到 $P_{e\max}$ 数值;

(2) 以当前系统等值机械功率 P_m 为迭代初值, ΔP 为迭代步长, 当迭代到第 k 步时, 求解此时机械功率曲线与电磁功率曲线的交点, 即

$$[\delta_{s,k}, \delta_{u,k}] = f[P_{e\max}(\delta) - (P_m - k \cdot \Delta P) = 0] \quad (6)$$

式中, $\delta_{s,k}$ 和 $\delta_{u,k}$ 代表两功率曲线交点处功角值。该切机控制命令下系统近似减速能量为

$$V_{D-k} = \int_{\delta_s}^{\delta_u} (P_e - P'_m) d\delta \approx \frac{1}{2} (\delta_{u,k} - \delta_{s,k}) (P_{e\max} + k \cdot \Delta P - P'_m) \quad (7)$$

(3) 迭代终止条件为

$$|V_U - V_{D-k}| \leq |V_U - V_{D-k+1}| \quad (8)$$

(4) 结合式(4), 可求得切机总量为

$$\Delta P_m = \frac{2V_U}{(\delta_{u,k} - \delta_{s,k})} + (P'_m - P_{e\max}) \quad (9)$$

求出的切机总量将按照下述方法在领先机群中执行切机操作。

2.2 切机效果的评估

在工程上切机措施选择主要根据角度判据, 即优先切除领先发电机群中相对角度最大的发电机。然而这种判据比较粗略, 角度最超前并不能代表切除后效果最显著。因为多种因素都会对系统稳定产生影响, 包括发电机运行参数与状态、故障地点、故障类型与清除时间、系统网络变化情况、切除发电机时刻等因素。而仅靠角度指标无法综合这些信息。依据前文中的分析, 不同切机方案对应不同减速能量, 相同的切机量下引起减速能量的增加幅度越大, 故障后暂态稳定的恢复措施中切机量越少, 一定程度上降低了电源减少带来的经济损失。

本文基于单位切机量下产生的减速能量定义以

下切机灵敏度评价指标, 如式(10)所示。

$$S = \frac{V_D}{u} \quad (10)$$

式中: V_D 为直流闭锁采取切机措施后的减速能量值; u 为相应控制量。在不同位置处采取相同切机量措施时, 引起故障后不稳定平衡点的变化不同, 在计算切机后减速能量时需先更新故障后不稳定平衡点。多机系统下的高维度矩阵方程求解困难, 超前机群中机组较多情况下计算量加倍。

考虑切机动作瞬间, 将有效切除以动能形式储存在发电机中的不平衡能量, 同时在减速能量的作用下, 抑制了送端等值系统动能的上升趋势, 因此这里以系统达到不稳定平衡点时与切机动作时的动能差值来近似减速能量的效果 V_D 。

$$V_{D1} = \frac{V_k \Big|_{\delta_s}^{\delta_u}}{u} \quad (11)$$

式中, V_k 为送电系统等值发电机的动能。因此对于大电网系统, 可借助于量测信息, 根据式(11)获得切机后的 V_{D1} , 作为切机效果评估指标。这里与角度指标不同的是, 角度指标是时变量, 不同时刻切机灵敏度不同, 而上述 V_{D1} 指标对于确定的切机措施是固定不变的。

2.3 切机量的分配方法

实际工程中同一厂站中包含多台机组, 它们的运行状态近似认为是一致的。考虑实际工程中切机动作的离散性, 每次切机动作是切除确定厂站中的确定数目的机组。采取切机措施恢复系统的稳定性, 作用效果不仅是瞬间减少了发电机组动能, 更重要的是影响了切机后暂态能量的分布, 所以当切机比例 k 较小时, 对于周围暂态能量分布结构影响较弱, 切机效果与切机量满足正比关系, 但当切机比例 k 较高时, 依据此种关系得到的效果与理想效果误差较大^[28]。因此, 以切机灵敏度指标为依据, 以发电机组的可切量为指导的切机策略需要进一步完善。

在上面切机效果灵敏度的基础上, 在搜索最佳切机量分配方案时, 进一步添加切机比例约束。首先根据上节所述方法, 将领先机群中的发电机按灵敏度大小进行排序, 灵敏度最大的发电机组编号 1, 切机分配方法可表达如式(12)。

$$\Delta P_m = \sum_{i=1}^n \eta_i \Delta P_{mi} \quad (12)$$

式中: η_i 取值为 0 或 1; ΔP_{mi} 为发电机 i 的待切除量。若 ΔP_{mi}^0 代表发电机 i 的初始机械功率值, ΔP_{mi} 取值判定方法如下:

当 $\Delta P_m / P_{m1}^0 \leq k$ 时, η_1 为 1, 其余全为零, $\Delta P_{m1} = \Delta P_m$; 当 $\Delta P_m / P_{m1}^0 > k$ 且 $(\Delta P_m - \Delta P_{m1}) / P_{m2}^0 \leq k$ 时, η_1 和 η_2 为 1, 其余全为零, $\Delta P_{m1} = k \cdot P_{m1}^0$, $\Delta P_{m2} = \Delta P_m - \Delta P_{m1}$ 。依次类推直至满足式(12)。k 值与网络规模有关, 可通过仿真测试的方法获得。

3 面向大容量直流闭锁的切机策略表整定

本文假设全系统具备测量和通信能力, 则基于减速能量的暂态功角稳定紧急切机控制策略表整定流程如图 4 所示。其主要包括切机总量评估和切机量合理分配两部分。切机总量评估阶段的主要任务包括: 故障后系统发电机和功角数据的采集, 基于 2.1 节方法进行系统等值, 评估该事故下应采取的切机控制总量; 切机量的分配阶段的主要任务是建立切机灵敏度表序, 获取切机比例约束。基于事故后发电机电磁功率及功角信息, 求解切机动作前系统累积的不平衡能量, 结合仿真获取的切机灵敏度和切机比例约束信息, 计算得到紧急控制策略并采取切机控制措施, 保证系统安全稳定运行。

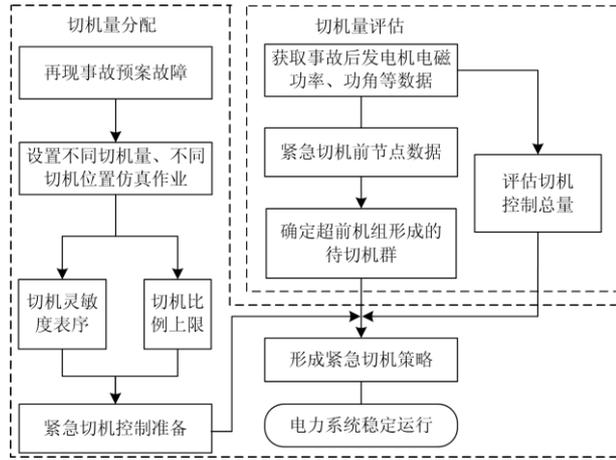


图 4 面向直流闭锁的切机策略表整定流程图

Fig. 4 Flowchart of the generator-tripping strategy table after DC blocking

4 算例分析

为验证本文所提的直流闭锁后切机策略的有效性, 本文搭建了如附录 A 中所示的交直流混联电网。其中 A 区域电网为送端电网, B 区域电网为受端电网, 两者均采用改进的 CEPRI-36 系统。两区域电网之间通过 1 条 500 kV 的 HVDC 输电线路和交流线路相连, 分别连接于 A 区域电网的 16A 与 B 区域电网的 16B 节点, 以及 A 区域电网的 24A 与 B 区域电网的 24B 节点。稳态时直流线路输送功率为

500 MW。

在直流互联电网稳定运行到 $t=1$ s 时刻, HVDC (16A-16B) 输电系统出现双极闭锁故障, 大功率冲击下送端系统失稳。故障后送端发电机的功角曲线如图 5 所示。由图 5 可知, 滞后群中仅有发电机 G3, 其余机组共同组成领先机群。

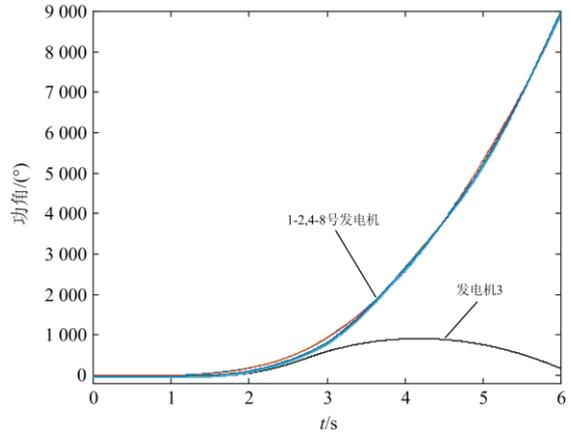


图 5 发电机功角曲线

Fig. 5 Curves of rotor angle

考虑故障信号传输以及切机动作迟滞带来的时延, 故障后 0.2 s 后开始执行切机操作, 故障后等值系统发电机功角曲线如图 6 所示。

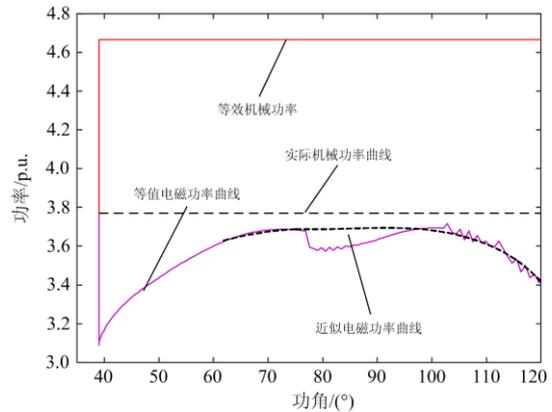


图 6 等值系统电磁功率-功角曲线

Fig. 6 Curve of power-angle for equivalent model

假设各种控制环节的延迟时间是 0.2 s, 则实际直流闭锁故障发生至切机动作前, 系统中累积的不平衡能量为 10.369 5 p.u., 根据式(9)计算所得的切机量为 3.42 p.u., 为与本文方法形成比较, 依据矩形近似得到切机量为 2.533 p.u., 在讨论切机量的分配之后, 形成具体的切机方案。

讨论故障后的切机灵敏度问题。在 1.2 s 时分别切除系统 1 号、2 号、4 号、5 号、7 号和 8 号机组

150 MW 出力(每次只对一台机进行操作),这里由于 6 号发电机本身出力较小,故其不参与领先机群中切机灵敏度的比较。对每一个措施按照式(9)所述方法,得到 V_{DI} 指标如表 1 所示。

表 1 切机灵敏度计算结果

Table 1 Calculation results of cutting sensitivity		
切机编号	V_{DI} 指标	切机时刻 COI 角度($^{\circ}$)
1 号	-0.004 07	25.832
2 号	-0.011	15.004
4 号	0.003 186	-11.871
5 号	0.004 464	-22.405
7 号	0.010 35	-0.442 8
8 号	0.010 39	-0.569 4

同时,表 1 中给出切机时刻各发电机组相对惯性中心的角度。根据 V_{DI} 指标,切机灵敏度排序为 $G_1 > G_2 > G_4 > G_5 > G_7 > G_8$,切机时刻相对 COI 的角度表明切机灵敏度顺序为: $G_1 > G_2 > G_7 > G_8 > G_4 > G_5$ 。观察发现,减速能量指标与角度指标不完全相同。因为文中所提指标考虑了切机后对系统中暂态能量分布的影响,所以评价切机效果时更加准确。

讨论发电机的切机比例限制问题。实际工程中,在采取切机措施恢复系统暂态稳定性时,经验要求最大切机量不得超过发电机初始出力的三分之一,这里采用仿真测试法,以发电机 1 为例,不断提升发电机的切机比例,同时记录下相应的减速能量,形成以下减速能量相对切机比例曲线,如图 7 所示。

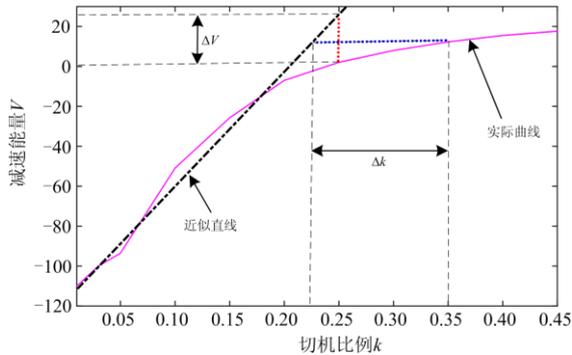


图 7 减速能量-切机比例曲线

Fig. 7 Curve of deceleration energy-cutting ratio

由图 7 可发现,当切机比例达到 20%时,便不再满足直线约束,当切机比例达到 25%时,误差达到 23%,而当切机比例达到 35%时,误差已经达到 60%,切机操作已经改变了故障区暂态能量的分布,切机量应限制,文中基于此确定式(7)中的 k 值为 0.25。按照式(9)所示的切机量的分配方法形成本文的切机策略为: G_1 切除 269 MW, G_2 切除 73 MW。

为与现有研究中采用的分配方案形成比较,即领先机群按照初始出力分配切机量,设置了以下对照组:

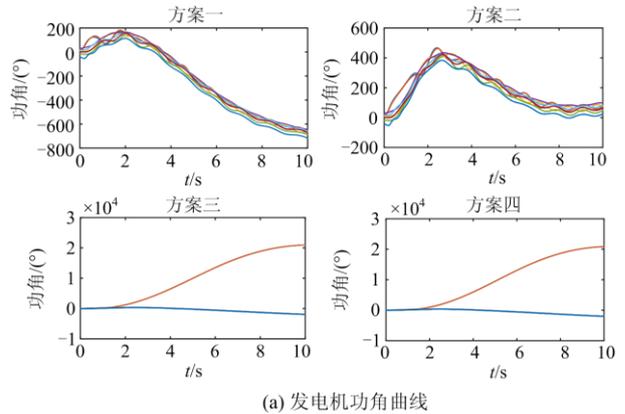
方案一:基于本文所提方法进行切机;

方案二:切机控制量为 3.42 p.u.,同时在领先机群中按照发电机出力分配切机量;

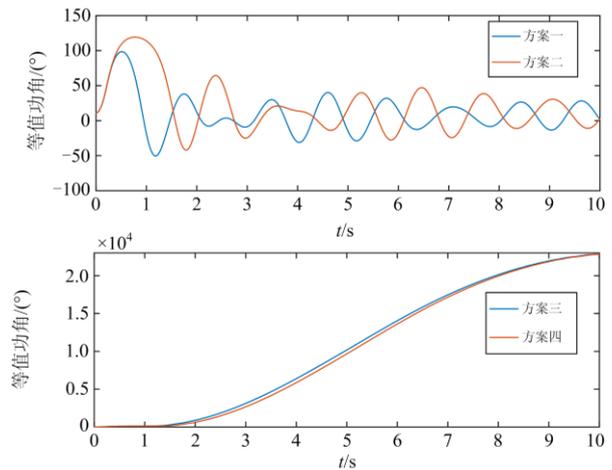
方案三:切机控制量为 2.533 p.u.,同时在领先机群中按照发电机出力分配切机方案;

方案四:切机控制量为 2.533 p.u.,同时按照本文切机量分配方法形成相应切机方案。

切机后相应的仿真结果如图 8 所示。



(a) 发电机功角曲线



(b) 等值功角曲线

图 8 切机效果比较

Fig. 8 Comparison of emergency control measures under different generator-tripping strategy

由图 8(a)可以看出,基于本文所提方法计算出的切机量可以有效使即将发生失稳的系统恢复稳定,与此同时,当切机控制量为 2.533 p.u.时,由于过于保守未能使系统进入稳定状态。进一步分析可以发现,如图 8(b)所示,当切机量确定后,虽然不同切机量分配方案下系统同样能够恢复稳定,但可以看出暂态过程中方案二对应等值功角曲线振荡幅

值更大, 接近 130° , 另一方面, 当施加相同的控制总量时, 本文所提切机量分配方案可以降低功角上升速度, 但如果切机控制量不足, 最终系统功角仍然失去稳定性。因此, 基于仿真现象, 相同情况下本文方法计算的切机量更能够有效抑制失稳, 恢复系统稳定性, 同时, 相同切机量下, 文中所提切机量分配方案能够更加有效地抑制功角摆开的速度, 从而在暂态稳定控制中具有一定的参考意义。

5 结论

面向大容量直流输电系统闭锁, 本文在分析了直流闭锁后暂态稳定性的临界条件后, 基于此形成本文的直流闭锁后切机策略。本文的研究结果总结如下:

附录 A

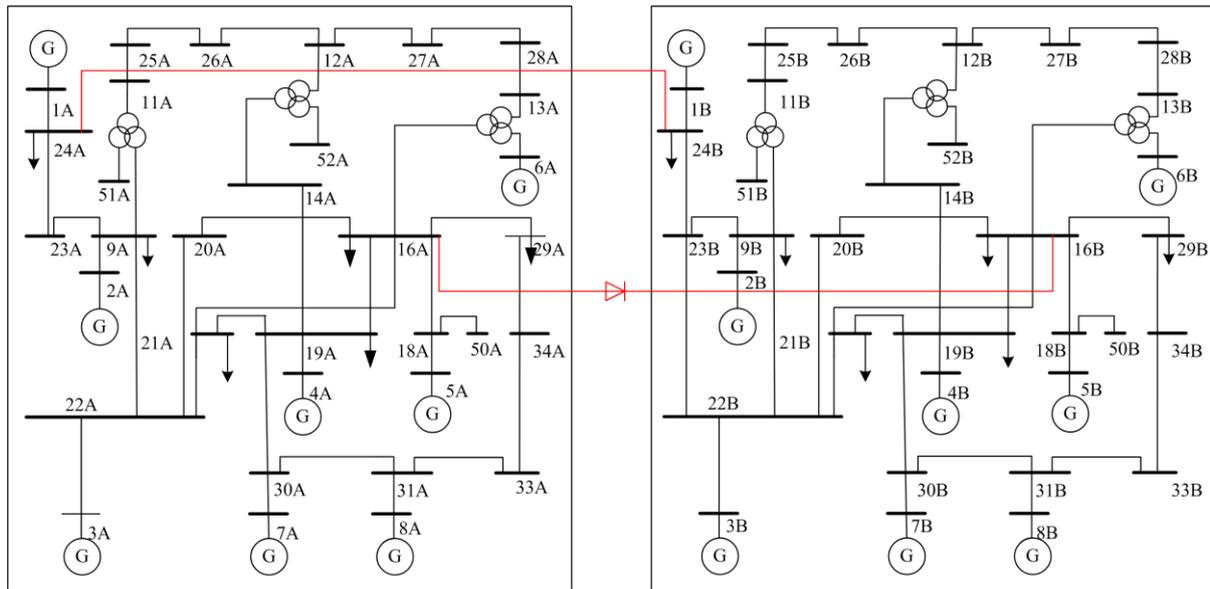


图 A 交直流混联电网结构图

Fig. A Structure diagram of AC/DC hybrid power grid

参考文献

[1] 章德, 田国梁, 谭玉东, 等. 提升交流系统暂态稳定性的多端直流最优紧急功率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 37-44.
ZHANG De, TIAN Guoliang, TAN Yudong, et al. Multi-terminal DC optimal emergency power control for improving transient stability of AC system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 37-44.

[2] 辛建波, 王玉麟, 舒展, 等. 特高压交直流接入对江西电网暂态稳定的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 71-79.
XIN Jianbo, WANG Yulin, SHU Zhan, et al. Analysis of

(1) 基于直流闭锁后等值功角曲线的特殊性, 提出直流闭锁后切机量的三角形近似法。该方法降低了切机控制量估算的保守性, 可以有效恢复系统的暂态稳定性。

(2) 从减速能量的角度定义直流切机灵敏度指标, 并将其推广至大电网系统, 形成快速计算切机灵敏度的方法, 可以弥补角度指标的局限性。

(3) 提出切机比例约束条件, 该方法是介于全切整台发电机和在领先机群中按照出力分配切机量之间的切机方法, 充分发挥了高灵敏度机组在恢复暂态稳定性上的优势, 同时考虑了故障区暂态能量分布的因素, 仿真结果证明所提紧急切机控制策略具有较好的暂态稳定恢复效果。

the influence of UHV AC and DC connection on the transient stability of Jiangxi Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 71-79.

[3] 张文嘉, 蔡晖, 王国腾, 等. 分散接入式混合直流系统的机电暂态建模与控制策略研究[J]. 高压电器, 2020, 56(9): 230-239.
ZHANG Wenjia, CAI Hui, WANG Guoteng, et al. Research on electromechanical transient modeling and control strategy of decentralized hybrid HVDC systems[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 230-239.

[4] 杨楠, 崔伟, 王智伟, 等. 含风电特高压直流系统单极接地故障暂态特性研究[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 142-149, 157.

- YANG Nan, CUI Wei, WANG Zhiwei, et al. Research on transient characteristics of monopolar grounding fault for wind power integrated UHVDC[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 142-149, 157.
- [5] 路建良, 关兆亮, 王新颖, 等. 高压大容量柔性直流输电阀基控制设备及其动态模拟试验研究[J]. 广东电力, 2020, 33(5): 105-116.
- LU Jianliang, GUAN Zhaoliang, WANG Xinying, et al. Research on valve-base control equipment of high voltage and large capacity VSC-HVDC and its dynamic simulation[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(5): 105-116.
- [6] 李聪聪, 王彤, 相禹维, 等. 基于改进高斯混合模型的概率潮流解析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 146-155.
- LI Congcong, WANG Tong, XIANG Yuwei, et al. Analytical method based on improved Gaussian mixture model for probabilistic load flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 146-155.
- [7] 吴萍, 张健, 屠竞哲, 等. 溪洛渡—浙西特高压直流投运后系统稳定特性及协调控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1873-1878.
- WU Ping, ZHANG Jian, TU Jingzhe, et al. System stability characteristics and coordinated control strategy after the operation of Xiluodu-Zhexi UHV DC Study on the security and stability control measures of the Xiluodu—Zhexi UHVDC[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1873-1878.
- [8] 屠竞哲, 杨莉, 黄涌, 等. 直流闭锁引发交流联络线功率波动的机理以及峰值计算[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 12-17.
- TU Jingzhe, YANG Li, HUANG Yong, et al. The mechanism and peak value calculation of AC tie-line power fluctuation caused by DC blocking[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 12-17.
- [9] 吴为, 汤涌, 孙华东, 等. 基于广域量测信息的电力系统暂态稳定研究综述[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 81-87.
- WU Wei, TANG Yong, SUN Huadong, et al. A survey on research of power system transient stability based on wide-area measurement information[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 81-87.
- [10] PHADKE A G, WALL P, DING L, et al. Improving the performance of power system protection using wide area monitoring systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(3): 319-331.
- [11] 张瑞琪, 闵勇, 侯凯元. 电力系统切机/切负荷紧急控制方案的研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 6-12.
- ZHANG Ruiqi, MIN Yong, HOU Kaiyuan. A new method for generation shedding/load shedding in power system emergency control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 6-12.
- [12] 陈树勇, 陈会员, 唐晓骏, 等. 风火打捆外送系统暂态稳定切机控制[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 514-519.
- CHEN Shuyong, CHEN Huiyuan, TANG Xiaojun, et al. Transient stability generator-tripping control of wind and fire binding external transmission system[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 514-519.
- [13] 项丽, 彭慧敏, 丁茂生, 等. 基于动态鞍点暂态动能灵敏度分析的紧急控制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 129-133.
- XIANG Li, PENG Huimin, DING Maosheng, et al. Emergency control based on dynamic saddle point transient kinetic energy sensitivity analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 129-133.
- [14] 任伟, 房大中, 陈家荣, 等. 大电网暂态稳定紧急控制下切机量快速估计算法[J]. 电网技术, 2008, 32(19): 10-15, 55.
- REN Wei, FANG Dazhong, CHEN Jiarong, et al. Fast estimation algorithm of cut-off capacity of large power grid transient stability emergency control[J]. Power System Technology, 2008, 32(19): 10-15, 55.
- [15] 王怀远, 张保会, 杨松浩, 等. 基于相平面特性的切机切负荷紧急控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4144-4152.
- WANG Huaiyuan, ZHANG Baohui, YANG Songhao, et al. Emergency control method of cutting machine and load based on phase plane characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4144-4152.
- [16] 顾卓远, 汤涌. 基于响应信息的电压与功角稳定实时紧急控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4876-4885.
- GU Zhuoyuan, TANG Yong. Real time emergency control scheme of voltage and power angle stability based on response information[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4876-4885.
- [17] 王佳丽, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于暂态能量的电力系统切机控制措施[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 1-9.
- WANG Jiali, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Power system switching control measures based on transient energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 1-9.
- [18] 应超楠. 受端大电网交直流连锁反应模式及传播路径研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- YING Chaonan. Research on AC and DC chain reaction mode and transmission path of large receiving power

- grid[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [19] 陈懿, 刘涤尘, 吴军, 等. 异步联网送端系统紧急切机控制方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 131-137.
CHEN Yi, LIU Dichen, WU Jun, et al. Control method of emergency cutting of asynchronous networking transmission end system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 131-137.
- [20] 屠竞哲, 张健, 王建明, 等. 大规模直流异步互联系统受端故障引发送端稳定破坏的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5492-5499.
TU Jingzhe, ZHANG Jian, WANG Jianming, et al. Mechanism analysis of receiving-end system stability failure caused by sending-end system fault in large-scale DC asynchronous interconnected system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5492-5499.
- [21] 张保会, 王怀远, 杨松浩. 电力系统暂态稳定性闭环控制(六)—控制地点的选择[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 1-5, 12.
ZHANG Baohui, WANG Huaiyuan, YANG Songhao. Power system transient stability closed loop control (6)—selection of control location[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 1-5, 12.
- [22] 赵晋泉, 邓晖, 徐光虎, 等. 基于区间联络线能量预测的暂态稳定紧急切机控制(一)机理与方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 114-119.
ZHAO Jinqun, DENG Hui, XU Guanghu, et al. Mechanism and method of transient stability emergency cut-off control based on energy prediction of interval tie line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 114-119.
- [23] 吴为, 饶宏, 洪潮, 等. 利用相平面轨迹特性的暂态稳定控制切机负效应的机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4572-4580.
WU Wei, RAO Hong, HONG Chao, et al. A study on the mechanism of the negative effect of the transient stability control on machine switching using the phase plane trajectory characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4572-4580.
- [24] 王怀远, 张保会, 杨松浩, 等. 电力系统暂态稳定切机控制策略表的快速整定方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 68-72, 79.
WANG Huaiyuan, ZHANG Baohui, YANG Songhao, et al. Fast setting method of power system transient stability shutdown control strategy table[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 68-72, 79.
- [25] 王少辉, 唐飞, 刘涤尘, 等. 应对多直流同时换相失败的直流功率能量补偿调制方法[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2876-2884.
WANG Shaohui, TANG Fei, LIU Dichen, et al. DC power energy compensation modulation method for coping with multiple-DC simultaneous commutation failures[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2876-2884.
- [26] 吴为, 汤涌, 孙华东. 基于系统加速能量的切机控制措施量化研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6134-6140.
WU Wei, TANG Yong, SUN Huadong. Quantitative research on generator-tripping control measures based on system acceleration energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6134-6140.
- [27] 吴为, 汤涌, 孙华东, 等. 暂态稳定受扰轨迹预测的模型参数自适应研究[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 827-834.
WU Wei, TANG Yong, SUN Huadong, et al. Research on self-adaption of model parameters for prediction of disturbed trajectories in transient stability analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 827-834.
- [28] 任伟. 基于暂态能量的电力系统暂态稳定切机控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
REN Wei. Study on power system transient stability switching control based on transient energy[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.

收稿日期: 2020-09-23; 修回日期: 2020-12-01

作者简介:

相禹维(1996—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析与控制; E-mail: 1977593218@qq.com

王彤(1985—), 女, 通信作者, 博士后, 副教授, 研究方向为电力系统稳定分析与控制; E-mail: hdwangtong@126.com

李聪聪(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析与控制。E-mail: licong0928@126.com

(编辑 魏小丽)