

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181185

兼顾源网安全的大规模电力外送基地多机失步保护动作策略

李振兴¹, 王振宇¹, 翁汉琮², 李振华², 徐艳春¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 梯级水电站运行与控制
湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

摘要: 在大规模电力外送基地中常规能源与新能源打捆外送的趋势日趋明显。针对系统发生多机失步时, 发电机安全与电网完整性对发电机失步保护要求的矛盾性, 提出一种兼顾源网安全的大规模电力外送基地多机失步保护动作策略, 切除最小机组保全系统稳定。立足于大规模电力外送基地多机失步的原因分析, 基于等面积定则, 提出多机失步下系统稳定控制策略。并从理论上分析和计算了在线路故障与负荷突变时系统稳定最优切机数, 提高了系统的稳定性。最后, 基于多机组并联外送系统的仿真模型验证了所提出的最小切机策略, 通过功角曲线变化说明了该策略的有效性。

关键词: 大规模电力外送基地; 兼顾源网安全; 多机失步保护; 等面积定则

Multi-generator out-of-step protection strategy for large-scale power transmission base

LI Zhenxing¹, WANG Zhenyu¹, WENG Hanli², LI Zhenhua², XU Yanchun¹

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station,
China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The trend of bundling regular and new energy has become apparent increasingly in large-scale power transmission base. There is a contradiction between the safety of generator and integrity of grid for multi-generator out-of-step protection. Therefore, multi-generator out-of-step protection action strategy is proposed for large-scale power transmission base considering the safety of both source and grid, maintaining system stability by removing the optimal unit in this paper. By analyzing the causes of multi-generator out-of-step in a large-scale power transmission base, this paper proposes a system stability control strategy under multi-generator out-of-step based on equal area criterion. The optimal cuts number of the system when line faults and loads change suddenly is analyzed and calculated theoretically, improving the stability of the system. Finally, simulation model based on delivery system of multi-unit in parallel verify the minimum cuts strategy proposed in this paper. The effectiveness of the strategy is illustrated by the change of the power angle curve.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607106) and Research Fund for Excellent Dissertation of China Three Gorges University (No. 2019SSPY050).

Key words: large-scale power transmission base; considering the safety of both source and grid; multi-generators out-of-step protection; equal area criterion

0 引言

在大规模电力外送基地中, 电力系统向着大机组、高电压方向发展, 导致机组容量越来越大, 发电机变压器的阻抗值也越来越大, 与此同时外部系

统的等值阻抗却减小了^[1]。因此, 当具备这种特征的强送端系统与相应的受端系统之间发生失步性振荡时, 振荡中心落于送端系统机群内部的可能性较大, 导致发电机多机失步。振荡导致机端电压持续波动, 严重影响厂用电的正常供给^[2]。而且, 失步可能损坏发电机定子绕组和轴系^[3], 所以从保障发电机本身安全的角度, 希望失步保护一旦检测到发电机失步就跳闸切机, 杜绝失步振荡损毁发电机的

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607106); 三峡大学学位论文培优基金项目资助(2019SSPY050)

可能^[4]。另一方面,从印度“7·30”大停电事故^[5]和巴西“11·10”大停电事故^[6]原因分析可知,在系统振荡过程中,失步保护过快切除发电机导致电网电源缺失,将会引发一系列连锁反应,从而造成灾难性电力事故。所以,为避免“雪崩式”切机造成巨大的能量不平衡状况,严重威胁整个系统的稳定运行^[7],失步保护动作前的控制策略对电网安全稳定运行也至关重要。因此对兼顾发电机机组和电网安全的失步保护研究显得越来越重要。

多数情况下,对发电机失步的研究是从源网两个方面分别进行的。从源侧考虑:文献[8]通过相位角在失步过程中的变化规律来研究失步对发电机的影响;文献[9-11]分别根据测量发电机功角、机端阻抗和基于能量的等面积定则对发电机进行失步保护的设置。立足于网侧进行研究,文献[12]针对发电机涉网保护和限制的整定值保守、配合关系不合理问题,提出了一种基于全过程动态仿真的发电机组涉网保护和限制自动校核方法;文献[13]针对实际电厂中涉网保护与限制之间配合不合理的问题,提出了大规模电网涉网保护与限制配合关系自动校核的方法。随着现代电力系统向着大机组、超高压方向发展,兼顾源网安全对失步保护的研究,将与实际情况更加接近。近些年来,也有部分学者对源网协调下失步保护进行研究^[14-15]。

本文正是在综合考虑发电机安全与电网完整性对发电机失步保护要求的基础上,分析大规模电力外送基地多机失步原因,并研究多机失步保护的动出口配合策略,形成兼顾源网安全的多机失步保护方案,在保证系统稳定的前提下,尽量少的切除发电机组,对系统振荡过程中维持系统完整性和保障电网安全稳定运行具有十分重要的意义。

1 多机失步的原因分析

发电机单机失步的原因有很多^[16],从源网两方面考虑可分为两大类:一是源侧的发电机不正常运行引起的失步,如发电机失磁或出力发生变化等;二是网侧系统发生振荡引起的失步,如机组近端线路的故障、负荷的突变或线路的切除等。

发电机多机失步的原因与单机失步有所不同^[17]。源侧的发电机不正常运行往往是由自身系统故障引起,属于单台机组的行为^[18],对于并联运行的多台发电机,所有的机组同时不正常运行的可能性不大,因此发电机不正常运行引起多机失步的概率极低。但是,网侧系统发生振荡一般是由外部系统的扰动造成,属于系统整体行为,并联运行的各台发电机所处的电磁环境相同,而且一般并联运行的各台机

组自身参数也大致相近,所以一旦引发失步振荡,各台机组都可能失步,即发生多机对系统失步。因此,引发多机失步的原因主要是网侧系统发生振荡。本文接下来将主要针对线路故障和突然甩负荷两方面分别造成的扰动进行分析。

采用图1所示的某发电厂系统图进行分析, n_1 、 n_2 台机组都连接主变并联运行并通过较短线路输出,两部分再并联通过高压长线路输出给无穷大系统供电。为研究振荡对 n_1 台机组影响的方便起见,可将 n_2 台机组与受端系统作为一个整体等效建模(以下简称为等效受端系统),即被等效为多机-无穷大系统,图2为该系统的等效电路图,各机组和变压器参数基本相同,等效受端系统的等值电抗 X'_s 为

$$X'_s = \left(\frac{X'_d + X_T}{n_2} + X_{L2} \right) \| X_{L3} \quad (1)$$

其中: X'_d 为发电机次暂态电抗; X_T 为变压器电抗; X_{L2} 、 X_{L3} 分别为输电线路L2、L3电抗。

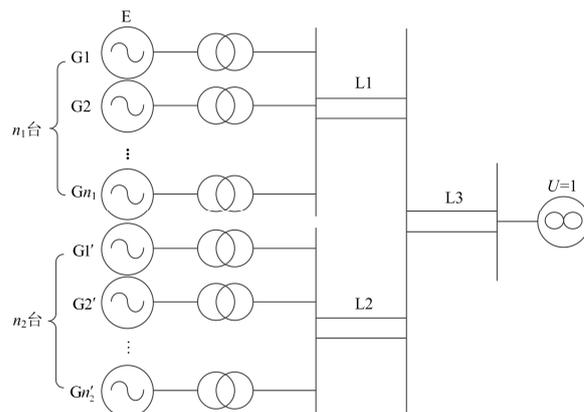


图1 发电厂系统图

Fig. 1 System diagram of power plant

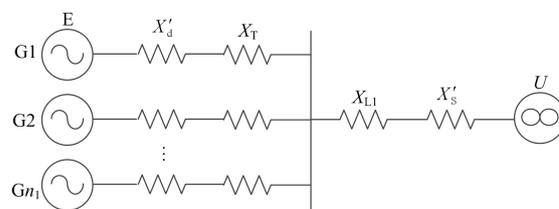


图2 系统等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of system

在多机-无穷大系统中, n_1 台发电机组并联运行于同一母线上,其功角平衡方程如式(2)所示。

$$P = \frac{EU}{(X'_d + X_T)/n_1 + X_{L1} + X'_s} \sin \delta \quad (2)$$

其中: E 为源侧等效电压; U 为网侧等效电压; δ 为两侧功角差。根据式(2)可进行以下分析。

当线路发生故障时，等效阻抗增大，导致发电机输出的电磁功率减小，原动机输入的机械功率大于发电机输出的电磁功率，多余的能量使发电机转速升高，对应的加速面积为 A_{acc} ，如图 3 功角特性所示；在故障线路切除后，等效阻抗减小，导致电磁功率增大，原动机输入的机械功率小于发电机输出的电磁功率，不足的部分由发电机转速降低释放的动能转化为电磁能来补充，最大可能的减速面积为 A_{dec} 。根据等面积定则，如果 $A_{acc} > A_{dec}$ ，系统不能保持暂态稳定而失步。

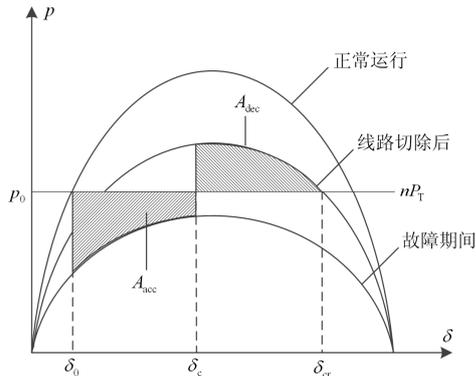


图 3 线路出现故障并切除该线路时的功角特性
Fig. 3 Power angle characteristics when the line fails and the line is cut off

当突然甩负荷时，等效阻抗增大，导致发电机输出的电磁功率减小，加速面积 A_{acc} 、减速面积 A_{dec} 如图 4 功角特性所示。随着甩负荷量的增大，加速面积增大而减速面积减小，甚至可能使减速面积减小到零，导致系统无法恢复稳定而失步。

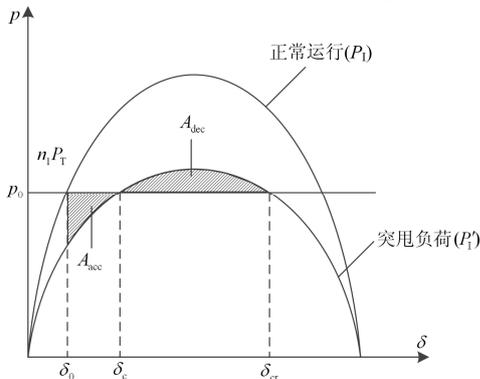


图 4 突然甩负荷时的功角特性

Fig. 4 Power angle characteristic when reducing load suddenly

2 兼顾源网安全的多机失步保护动作策略

对于多机失步保护动作可能导致整个发电厂的机组短时间内全部离网问题，需立足于把源网两侧作为一个整体，考虑全系统的协调，站在系统保护

的角度思考问题。当发生多机失步时，如果采用主动调频和励磁等无损措施后也无法平息振荡，此时可以考虑有损切机措施。可能只需要切除部分机组即可平息振荡，使系统重新恢复同步运行。从适应智能电网韧性电源需求的角度出发，应避免多机失步同时跳闸对系统造成的冲击，尽量保持系统在振荡过程中的完整性。因此，研究多机失步的保护动作配合策略及其重要。

兼顾源网安全多机失步保护的关键点在于最少切除发电机机组数可以使系统恢复同步运行。这样做从源的安全角度，主要考虑处于失步运行的发电机单机或机群在失步保护动作前系统不再失步，进而避免失步对定子绕组和轴系的损坏，达到保障机组的安全；从网侧安全角度考虑，让系统恢复同步的同时，又尽可能少地切除机组，保障了系统的电源支撑。下面分别针对前文所提及到的两种失步场景进行分析。

2.1 线路故障

对于该多机-无穷大系统，当线路切除故障瞬间，通过识别网络拓扑结构可以分别计算出加速面积 A_{acc} 和最大可能减速面积 A_{dec} [19]，若 $A_{acc} > A_{dec}$ ，则可以预测该系统将发生多机失步，此时发电机失步保护应动作。采用图 1 某发电厂系统图进行分析，依旧采用上述等效方法。假设失步保护跳闸在 n_1 机组中切除 m 台机组，为了直观和方便计算，可等效为 $(n_1 - m)$ 台与 m 台机组并联连接。按以上等效思想可得到图 5 切机系统等效电路图，对应的功角特性如图 6 所示。

图 6 中，因为在线路切除后失步保护才跳开机组，所以正常运行时和故障期间的等效发电机输出电磁功率仍分别为 P_1 和 P_{II} ，等效发电机输入机械功率仍为 $n_1 P_T$ ；线路切除后由于跳开了 m 台机组，等效发电机输出电磁功率变为 P_{III} ，输入机械功率为 $(n_1 - m) P_T$ 。切除 m 台机组后一方面发电机和变压器的等效电抗值变大，使得输出功角特性曲线降低，另一方面输入机械功率也减小，因此最大可能的减速面积 A_{dec} 变化未知，其值为切除机组台数 m 的函数，记为 $A_{dec}(m)$ 。

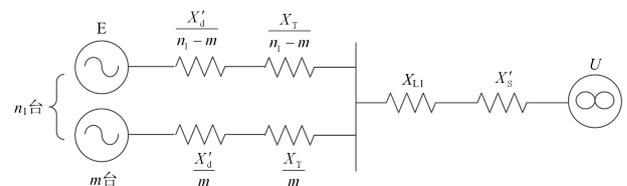
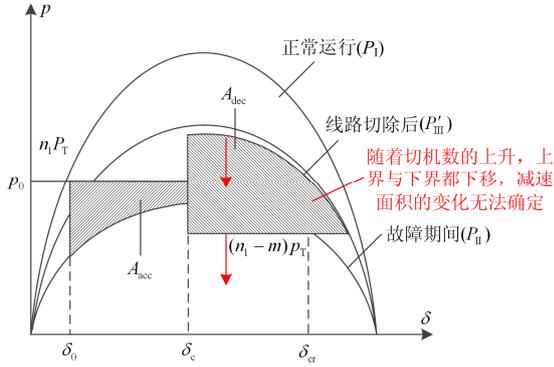


图 5 切机系统等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit of cutting machine system

图 6 系统线路故障后切除 m 台机组的功角特性Fig. 6 Power angle characteristic of system for tripping m generators after line fault

当实测功角略大于极限切除角时才切除故障, 如果不采取措施, 根据等面积定则可以分析得到系统将失去稳定。此时可采取有损切机措施, 将有可能让系统恢复稳定。等效电抗的计算借助文献[20]思想, 计算过程如下: 加速面积是固定的一常数, 用式(3)表示。

$$A_{acc} = \int_{\delta_0}^{\delta_c} (n_1 P_T - P_{II} \sin \delta) d\delta \quad (3)$$

根据前文分析, 减速面积是切机数 m 的函数, 用式(4)表示。

$$A_{dec}(m) = \int_{\delta_c}^{\delta_{cr}} [P'_{III} - (n_1 - m)P_T] d\delta \quad (4)$$

其中:

$$P'_{III} = \frac{E'U}{(X'_d + X_T)/(n_1 - m) + X'_{L1} + X'_S} \sin \delta \quad (5)$$

令 $A_{dec}(m) = A_{acc}$, 基于式(3)一式(5)可计算出 m 值的表达式, 如式(6)。

$$m = n_1 - \frac{-b_1 \pm \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1} \quad (6)$$

其中:

$$a_1 = P_T(X'_{L1} + X'_S)(\delta_{cr} - \delta_c) \quad (7)$$

$$b_1 = [n_1 P_T(\delta_c - \delta_0) + P_{II}(\cos \delta_c - \cos \delta_0)](X'_{L1} + X'_S) \cdots + P_T(\delta_{cr} - \delta_c)(X'_d + X_T) + E'U(\cos \delta_{cr} - \cos \delta_c) \quad (8)$$

$$c_1 = [n_1 P_T(\delta_c - \delta_0) + P_{II}(\cos \delta_c - \cos \delta_0)](X'_d + X_T) \quad (9)$$

$$P_{II} = \frac{E'U}{(X'_d + X_T)/n_1 + X'_{L1} + X'_S + \frac{(X'_d + X_T)/n_1 + X'_{L1} + X'_S}{X_{\Delta}}} \quad (10)$$

式中: E' 为等效电源电压; U 为等效受端电压; X_{Δ}

为故障期间加在正序网络故障点上的附加电抗; X_{L1} 为线路正常运行时的电抗; X'_{L1} 为切除故障后该线路的电抗; X'_S 为等效受端系统的等值电抗; X'_d 为单台发电机电抗; X_T 为单台变压器电抗; δ_0 (弧度)为故障发生时角度; δ_c (弧度)为切除故障和发电机时角度; δ_{cr} (弧度)为极限运行时角度。

对式(6)的两个解进行分析, 因为 m 一定小于 n_1 , 舍弃 $-b_1 - \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}$ 的解。剩余的解:

$$m = n_1 - \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1} \quad (11)$$

就式(11)而言:

① $b_1^2 - 4a_1c_1 > 0$, 要使 m 小于 n_1 , 需 $\sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1} > b_1$, 结果与 $a_1b_1c_1 > 0$ 矛盾, 故舍弃;

② $b_1^2 - 4a_1c_1 < 0$, 要使 m 小于 n_1 , 需 $\sqrt{4a_1c_1 - b_1^2} > b_1$ 。

即: $b_1^2 < 2a_1c_1$, 与已知条件不矛盾。

因此, m 的有效解为式(12)。

$$m = n_1 - \frac{\sqrt{4a_1c_1 - b_1^2} - b_1}{2a_1} \quad (12)$$

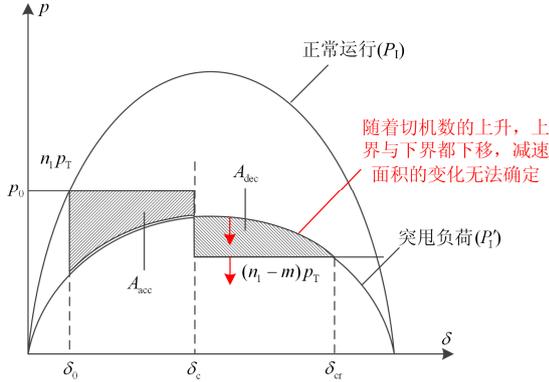
此时, m 值并不一定是整数, 为使系统恢复同步, 真正切机的台数一定不小于 m , 本文提出采取进一法取整数解 m_0 , 即最少需要切除的机组台数。

若式(12)无解, 则表明多机失步保护无论切除多少台机组都无法避免失步, 此时多机失步应不动作, 等待各台机组的单机失步保护判据满足后动作切除机组^[21], 以保障机组的安全, 同时也发挥了机组承受失步振荡的能力^[22-23]。

2.2 突然甩负荷

对于该多机-无穷大系统, 当其突然甩负荷时, 通过识别网络拓扑结构可以分别计算出加速面积 A_{acc} 和最大可能减速面积 A_{dec} ^[19], 当 $A_{acc} > A_{dec}$, 则可以预测系统失稳。继续采用图 1 某发电厂系统图进行分析。按前文采用的等效思想, 假设甩负荷量足以让系统失去稳定, 对应的功角特性如图 7 所示。

突然甩负荷使得系统等效阻抗增大, 电磁功率下降, 如图 7 中所示, 正常运行时和甩负荷运行时的等效发电机输出电磁功率分别为 P_1 和 P'_1 , 等效发电机输入机械功率为 $n_1 P_T$; 在极限切除角 δ_c 处跳开 m 台机组, 等效发电机输入机械功率为 $(n_1 - m) P_T$ 。切机后, 一方面发电机和变压器的等效电抗值变大, 使得输出功角特性曲线降低, 另一方面输入机械功

图7 系统突然甩负荷后切除 m 台机组的功角特性Fig. 7 Power angle characteristic of system for tripping m generators after reducing load suddenly

率也减小, 因此最大可能的减速面积 A_{dec} 变化未知, 其值为切除机组台数 m 的函数, 记为 $A_{dec}(m)$ 。

上述情况下, 如果不采取切机措施, 按等面积定则可以分析得到系统将失去稳定。此时可采取切机措施, 将有可能让系统恢复稳定。计算过程如下: 加速面积是固定的一常数, 用式(13)表示。

$$A_{acc} = \int_{\delta_0}^{\delta_c} (n_1 P_T - P'_{IM} \sin \delta) d\delta \quad (13)$$

根据前文分析, 减速面积是切机数 m 的函数, 用式(14)表示。

$$A_{dec}(m) = \int_{\delta_c}^{\delta_{cr}} [P'_1 - (n_1 - m)P_T] d\delta \quad (14)$$

其中,

$$P'_1 = \frac{E'U}{(X'_d + X_T)/(n_1 - m) + X_{L1} + X''_S} \sin \delta \quad (15)$$

令 $A_{dec}(m) = A_{acc}$, 基于式(13)一式(15)可计算出 m 值的表达式, 如式(16)。

$$m = n_1 - \frac{-b_2 \pm \sqrt{b_2^2 - 4a_2c_2}}{2a_2} \quad (16)$$

其中:

$$a_2 = P_T(X_{L1} + X''_S)(\delta_{cr} - \delta_c) \quad (17)$$

$$b_2 = [n_1 P_T(\delta_c - \delta_0) + P'_{IM}(\cos \delta_c - \cos \delta_0)](X_{L1} + X''_S) \cdots + P_T(\delta_{cr} - \delta_c)(X'_d + X_T) + E'U(\cos \delta_{cr} - \cos \delta_c) \quad (18)$$

$$c_2 = [n_1 P_T(\delta_c - \delta_0) + P'_{IM}(\cos \delta_c - \cos \delta_0)](X'_d + X_T) \quad (19)$$

$$P'_{IM} = \frac{E'U}{(X'_d + X_T)/n_1 + X_{L1} + X''_S} \quad (20)$$

式中: E' 为等效电源电压; U 为等效受端电压; X_{L1} 为线路正常运行时的电抗; X''_S 为等效受端系统用

负荷后的等值电抗; X'_d 为单台发电机电抗; X_T 为单台变压器电抗; δ_0 (弧度) 为故障发生时角度; δ_c (弧度) 为切除故障和发电机时角度; δ_{cr} (弧度) 为极限运行时角度。

根据前文线路故障时, 对 m 的取值所分析的思路, 同理可得突然甩负荷时 m 的有效解为式(21)。

$$m = n_1 - \frac{\sqrt{4a_2c_2 - b_2^2} - b_2}{2a_2} \quad (21)$$

此时, m 值并不一定是整数, 为使系统恢复同步, 真正切机的台数一定不小于 m , 本文提出采取进一法取整数解 m_0 , 即最少需要切除的机组台数。

若式(21)无解, 则表明多机失步保护无论切除多少台机组都无法避免失步, 此时多机失步应不动作, 等待各台机组的单机失步保护判据满足后动作切除机组^[21], 以保障机组的安全, 同时也发挥了机组承受失步振荡的能力。

3 仿真验证

为了验证本文上述理论分析, 采用 PSCAD-EMTDC 仿真软件搭建图 8 所示的网络拓扑进行仿真验证。

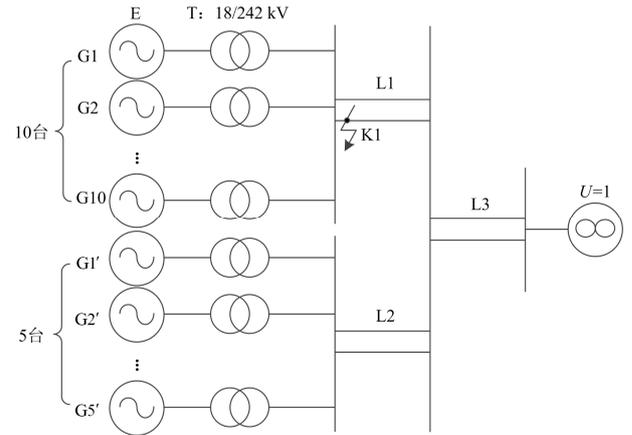


图8 仿真系统图

Fig. 8 Circuit of simulation system

各元件参数如下:

发电机 G: $S_N = 300$ MVA, $P = 180$ kW, $Q = 90$ kvar, $U_G = 18$ kV, $X'_d = 0.32$, $X_2 = 0.23$, $\cos \varphi = 0.83$;

变压器 T: $S_N = 360$ MVA, $U_s(\%) = 14$;

线路 L1, L2: $x_1 = 0.47$ Ω /km, $x_0 = 4x_1$, $L = 10$ km, $U_N = 220$ kV;

线路 L3: $x_1 = 0.47$ Ω /km, $x_0 = 4x_1$, $L = 90$ km, $U_N = 220$ kV;

运行情况: 无限大系统母线吸收的功率为

$P_0 = 250 \text{ MW}$, $\cos \varphi_0 = 0.83$, $U = 115 \text{ kV}$ 。

由于单相接地和三相短路分别是发生频率最高和最严重的故障, 具有典型性和代表性, 所以仿真时分别设定线路 L1 出口发生单回路单相接地短路和单回路三相接地短路, 再加上系统突甩负荷场景, 进行分析计算。考虑到自动调压措施的存在, 电压基本上可以认为保持在稳定的范围内, 因此, 针对以上场景作机组电势不变化处理。当实测功角略大于极限切除角时才采取切机措施, 切除计算出来的最小切机数, 通过监视系统功角变化来验证策略的可行性。

3.1 单回路单相接地短路

图 8 中 K1 点处在 0.5 s 时发生单相接地短路, 1.1 s 时故障消失。以下计算均采用标幺制进行, 取 $S_B = 250 \text{ MVA}$, $U_{B(110)} = 115 \text{ kV}$, 可计算出故障发生时角度 δ_0 (弧度) 为 0.132 6, 切除故障和发电机时角度 δ_c (弧度) 为 1.056 6, 极限运行角度 δ_{cr} (弧度) 为 2.826, 线路故障期间加在正序网络故障点上的附加电抗 X_{Δ} 为 0.034 9, 线路切除故障后该线路的等值电抗 X_{L1} 为 0.023 5, 等效受端系统的等值电抗 X'_s 为 0.068 9, 代入上式(7)一式(10)可得: $c_1 = 3.495 2$, $P_{lim} = 2.373 8$, $a_1 = 0.163 5$, $b_1 = 0.076 2$, 继而代入式(12)求得 $m = 5.6$ 。由于 m 是整数且需让系统恢复稳定, 所以采取进一法得最小切机数为 6 台。

图 9 示出了在发生单相接地故障时是否采取切机措施下发电机功角变化情况的对比。由图可知系统发生单相接地故障后, 如果不采取措施, 发电机将在 7 s 左右发生失步。但如果采取最小切机措施,

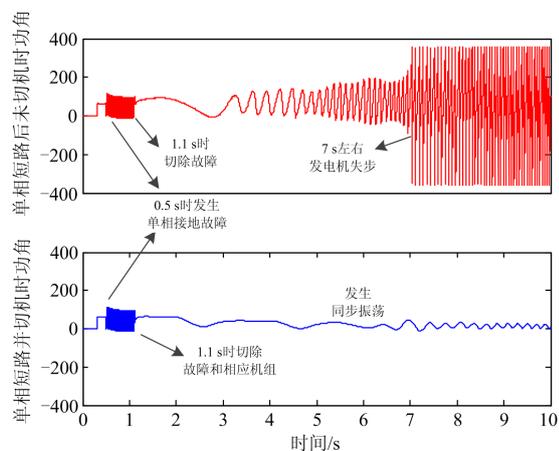


图 9 未切机/切机功角变化曲线(AG 故障)

Fig. 9 Power angle change curve of uncutting or cutting machine (AG failure)

系统将发生同步振荡, 发电机避免发生失步。再结合主动调频和励磁等无损措施, 系统定将恢复稳定。

通过上述发电机功角变化曲线对比和分析, 可以验证最小切机策略的可行性。

3.2 单回路三相接地短路

图 8 中 K1 点处在 0.5 s 时发生三相接地短路, 1.1 s 时故障消失。按以上计算步骤可得到最小切机数为 8 台。

图 10 示出了在发生三相接地故障时是否采取切机措施下发电机功角变化情况的对比。由图可知系统发生三相接地故障后, 如果不采取措施, 发电机将在 6 s 左右发生失步。但如果采取最小切机措施, 系统将发生同步振荡, 发电机避免发生失步。再结合主动调频和励磁等无损措施, 系统定将恢复稳定。

通过上述发电机功角变化曲线对比和分析, 可以验证最小切机策略的可行性。

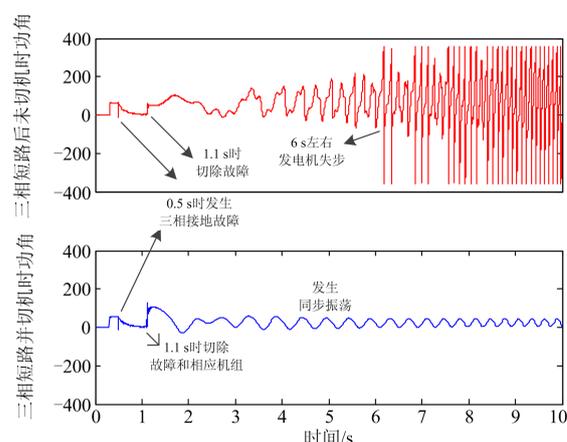


图 10 未切机/切机功角变化曲线(ABC 故障)

Fig. 10 Power angle change curve of uncutting or cutting machine (ABC failure)

3.3 突然甩负荷

系统突然甩负荷, 仿真中等效为增加电抗 50Ω , 将线路参数和系统运行典型值代入式(21)近似计算可得到最小切机数为 7 台。

图 11 示出了系统突然甩负荷时是否采取切机措施下发电机功角变化情况的对比。由图可知突然甩负荷后, 如果不采取措施, 发电机将在 6 s 左右发生失步。但如果采取最小切机措施, 系统将发生同步振荡, 发电机避免发生失步。再结合主动调频和励磁等无损措施, 系统定将恢复稳定。

通过上述发电机功角变化曲线对比和分析, 可以验证最小切机策略的可行性。

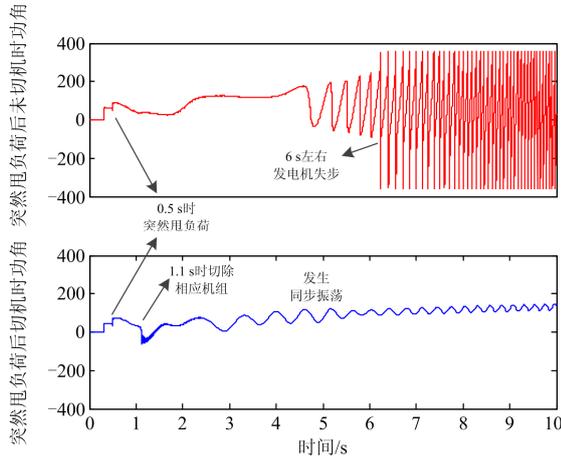


图 11 未切机/切机功角变化曲线(突然甩负荷)
 Fig. 11 Power angle change curve of uncutting or cutting machine (reduce load suddenly)

4 结论

按照韧性电源的要求，发电机失步保护需要兼顾机组和电网的安全。本文围绕兼顾源网安全的大规模电力外送基地多机失步保护展开研究。分析了大规模电力外送基地发生多机失步的原因。在此基础上提出了兼顾源网安全的大规模电力外送基地多机失步保护动作策略，计算了最小切机数。最后采用 PSCAD-EMTDC 仿真软件验证了最小切机策略的可行性。

当系统发生振荡且无损措施无法起作用时，采用发电机机群最大化保全策略，使系统恢复稳定。如此，一方面可以避免发电机大面积离网的灾难性事故，另一方面也可以降低系统振荡对发电机群与整个系统稳定的影响，有利于后续安稳措施的展开。本文所提出的最小切机策略作为发电机群最大化保全策略的初步想法，还有很多方面需要继续进行研究，比如切除机组的选择策略、与无损措施相配合等等。

参考文献

[1] 刘健, 魏昊焜, 张志华, 等. 未来配电网的主要形态--基于储能的低压直流微电网[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 11-16.
 LIU Jian, WEI Haokun, ZHANG Zhihua, et al. Future architecture of power distribution micro-grids based network low-voltage direct current on energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 11-16.

[2] 郭珂, 唐飞, 廖清芬, 等. 多频失步振荡场景下大区互联电网失步振荡中心电压频率演变规律研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3257-3263.
 GUO Ke, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. Study on

out-of-step center in multi-frequency oscillation of interconnected power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3257-3263.

[3] 姚骏, 曾欣, 李嘉伟. 并网双馈感应风电系统轴系振荡特性[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 123-135.
 YAO Jun, ZENG Xin, LI Jiawei. Shaft oscillation characteristics of grid-connected doubly-fed induction generator-based wind power generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 123-135.

[4] ALINEZHAD F B, KAREGAR H K. Out-of-step protection based on equal area criterion[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 968-977.

[5] 林伟芳, 孙华东, 汤涌, 等. 巴西“11.10”大停电事故分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 1-5.
 LIN Weifang, SUN Huadong, TANG Yong, et al. Analysis and lessons of the blackout in brazil power grid on November 10, 2009[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 1-5.

[6] 汤涌, 卜广全, 易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 167-174, 23.
 TANG Yong, BU Guangquan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian Power Grid on July 30 and 31, 2012[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 167-174, 23.

[7] FARANTATOS E, HUANGR, COKKINIDES G J, et al. A predictive generator out-of-step protection and transient stability monitoring scheme enabled by a distributed dynamic state estimator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1826-1835.

[8] 肖固城, 唐飞, 廖清芬, 等. 一种可改善失步振荡模式的风电虚拟惯性控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 61-70.
 XIAO Gucheng, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. A virtual inertia control strategy of wind power to improve the out-of-step oscillation modes[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 61-70.

[9] 刘新东, 江全元, 黄志光, 等. 基于广域测量系统的功角稳定预测与发电机失步保护的协调控制[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 52-55.
 LIU Xindong, JIANG Quanyuan, HUANG Zhiguang, et al. Coordination between rotor angle stability and out-of-step protection based on WAMS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 52-55.

[10] 王玉龙, 王宝华, 陆桂华, 等. 基于 PSCAD 的大型机组失步保护仿真与整定校验[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 124-129.

- WANG Yulong, WANG Baohua, LU Guihua, et al. PSCAD-based setting calculation and simulation of out-of-step protection for large units[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 124-129.
- [11] PAUDYAL S, RAMAKRISHNA G, SACHDEV M S. Application of equal area criterion conditions in the time domain for out-of-step protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 600-609.
- [12] 袁亮, 吴国旻, 杨明玉, 等. 基于全过程动态仿真的发电机组涉网保护和限制自动校核[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 115-121.
- YUAN Liang, WU Guoyang, YANG Mingyu, et al. Automatic check of grid related protections and limitations based on full dynamic simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 115-121.
- [13] 刘桂林, 宋玮, 宋新立. 基于涉网保护的励磁限制、失磁保护与失步保护配合的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 107-112.
- LIU Guilin, SONG Wei, SONG Xinli. Research on coordination of low excitation limit, loss of excitation protection and out-of-step protection based on grid-related protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 42(23): 107-112.
- [14] 黄远洋, 王华锋. 大型机组失步保护网源协调特性研究[J]. 华北电力技术, 2017(4): 28-37.
- HUANG Yuanyang, WANG Huafeng. Study on out-of-step protection about characteristics of coordination between generating units and power grid[J]. North China Electric Power, 2017(4): 28-37.
- [15] 穆钢, 崔杨, 刘嘉, 等. 有待用风电机组且传输受限电网的源网协调调度方法(英文)[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 24-29.
- MU Gang, CUI Yang, LIU Jia, et al. Source-grid coordinated dispatch method for transmission constrained grid with surplus wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 24-29.
- [16] 丁建良. 基于机网协调的大型机组的保护研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- DING Jianliang. Research on protection of large generator unit connected with power system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2012.
- [17] 王育学. 适应智能电网韧性电源需求的大型发电机保护研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- WANG Yuxue. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [18] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [19] PAUDYAL S, RAMAKRISHNA G, SACHDEV M S. Application of equal area criterion conditions in the time domain for out-of-step protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 600-609.
- [20] 张项安, 姚晴林, 陈海龙. 发电机失步保护整定计算所用的等值联系电抗 $X_{(con)}$ 研究——与现行《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》商榷[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 97-102.
- ZHANG Xiang'an, YAO Qinglin, CHEN Hailong. Research on equivalent contact reactance $X_{(con)}$ setting calculation for generator out-of-step protection—discuss with guide of calculating settings of relay protection for large generator and transformer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 97-102.
- [21] SHRESTHA B, GOKARAJU R, SACHDEV M. Out-of-step protection using state-plane trajectories analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 1083-1093.
- [22] YANG J, TANG F, LIAO Q F, et al. Study on electrical parameter frequency of the out-of-step oscillation center[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 577: 536-540.
- [23] KAKIMOTO N, SUGUMI M, MAKINO T, et al. Monitoring of interarea oscillation mode by synchronized phasor measurement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 260-268.

收稿日期: 2018-09-17; 修回日期: 2018-11-19

作者简介:

李振兴(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制; E-mail: lzx2007001@163.com

王振宇(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制; E-mail: 594065551@qq.com

翁汉珺(1980—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析、继电保护与控制。E-mail: honey-weng@163.com

(编辑 姜新丽)