

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190785

考虑发电机性能差异性的励磁顶值电压优化配置方法

张志杰¹, 姚伟¹, 高磊², 文劲宇¹

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 发电机强励紧急控制配合具备高顶值电压的励磁系统, 可充分发挥机组强励功能, 改善电网暂态稳定性。发电机励磁系统通常按照统一标准设计, 无法兼顾实际故障下机组能够发挥的不同调节性能。考虑调节性能差异性后对发电机实施差异化控制或差异化配置控制参数, 可有效优化网源协调性。提出一种考虑机组性能差异性的励磁顶值电压优化配置方法, 利用系统暂态稳定裕度指标相对机组励磁顶值电压的灵敏度衡量不同临界机的调节性能, 根据灵敏度大小对临界机组励磁顶值电压进行差异化配置。在修改的10机39节点交直流混联系统中, 仿真研究表明: 差异化配置励磁顶值电压能较好改善系统暂态稳定性, 提升区域联络线输送功率, 严重故障冲击下对系统暂态稳定性提升作用更显著。

关键词: 励磁系统; 强励紧急控制; 差异化设计; 暂态稳定性; 发电机

Optimal configuration of excitation system ceiling voltage considering different performance of generators

ZHANG Zhijie¹, YAO Wei¹, GAO Lei², WEN Jinyu¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Generator Forced Excitation Emergency Control (GFEEC) combined with a high excitation system ceiling voltage can make the best use of the generator strong excitation function and then improve the transient stability of the power grid. The generator excitation system is usually designed according to a uniform standard, such that it is impossible to consider the different adjustment performance that a unit can perform under actual faults. If differentiated control strategies or configuration of control parameters are applied to the generators after taking into account the adjustment performance difference, the coordination between power grid and source can be effectively optimized. In this paper, an optimized method of configuring the excitation system ceiling voltages of different generators is proposed. The sensitivity of the system transient stability margin index to the excitation system ceiling voltage of each generator is calculated to measure the different adjustment performance of critical generators. Then, the excitation system ceiling voltages of critical generators are configured respectively according to the value of sensitivity. The simulation study in the modified 10-machine 39-bus AC/DC hybrid system shows that the transient stability of the system and the transmission power of the area tie-line can be improved significantly with the differential configuration of excitation system ceiling voltages. Under some severe faults, the improvement of the system transient stability is even more significant.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Technical Research of Grid-Source Coordination Performance Assessment and Optimization based on Generator Performance Differentiation and Power Grid Dominated Stability” and National Natural Science Foundation of China (No. 51577075).

Key words: excitation system; forced excitation emergency control; differentiated design; transient stability; generator

0 引言

发电机励磁系统在提升电力系统暂态稳定性方

基金项目: 国家电网公司科技项目资助“基于发电机性能差异化及电网主导稳定的网源协调性能评估和优化技术研究”; 国家自然科学基金项目资助(51577075)

面发挥着重要作用^[1-6]。发电机机组的强励功能可以在故障后短时间内向系统提供动态无功, 提高发电机输出电压, 增加输出电磁功率而使发电机加速过程得到有效抑制, 以提高电力系统暂态稳定性^[7-10]。大机组、大电网的发展对事故情况下的励磁强励性能的要求更加提高。励磁系统的顶值电压是励磁系统最主要的大干扰强励性能指标, 提高顶值电压对

系统暂态稳定有利^[11]。受励磁主回路设备的过压过流能力限制,励磁顶值电压不能无限制提升,励磁系统的强励性能也因此受限^[12-13]。

为了充分发挥励磁系统的强励功能改善电力系统暂态稳定性,文献[14-17]通过加装电力系统电压调节器,提高发电机有效无功储备容量以提升系统暂态稳定性。文献[18]提出一种广域强励紧急控制方案,增加了强励能够发挥作用的时间,对抑制系统首摆失稳具有良好效果,但该方案只有在临界机组具备较高的励磁顶值电压下才能发挥其控制效果。当励磁顶值电压不足或过低时,电压恢复较慢甚至没有作用。文献[19-20]提出在主励磁回路基础上进行独立电源叠加式强励,当系统遭遇严重故障时开启附加强励回路增加励磁顶值,提升了暂态稳定性。因此,研究如何合理配置发电机励磁顶值电压保证强励控制措施的有效性是十分必要的工作。文献[21]研究多机系统发电机组强励电压倍数优化配置算法,在经济约束下求取使暂态稳定裕度最大化的强励倍数配置方案。但采用拟合方法确定稳定裕度与强励倍数关系,误差不可避免,也不能很好应对稳定裕度与强励倍数存在强非线性关系的情形。

故障扰动下不同发电机因距离故障远近以及自身参数不同,对系统故障恢复的调节能力存在明显差异性。现有的研究很少考虑不同发电机对故障调节能力的差异,有差别地对各个发电机实施控制或有差别地配置发电机控制系统参数。对发电机励磁系统进行改造时,在不同机组提升相同大小的励磁顶值电压,对系统暂态稳定性能的改善效果是不一样的。本文在发电机强励紧急控制基础上提出了用以提升系统暂态稳定性的发电机励磁顶值电压优化配置方法。考虑了临界机组中不同发电机对系统的调节作用差异性,利用系统暂态稳定裕度指标相对机组励磁顶值电压的灵敏度衡量不同临界机的调节性能,根据灵敏度大小对临界机组励磁顶值电压进行差异化配置,更好地提升系统暂态稳定性。在修改的10机39节点交直流混联系统中,仿真表明:差异化配置励磁顶值电压后可有效改善系统暂态稳定性。

1 强励紧急控制提升系统暂态功角稳定性

1.1 多机系统的单机等值

电力系统的短路故障是实际运行中最普遍的大扰动。短路通常引起短路点附近电压明显下降,发电机输出电磁功率减少,发电机转子因原动机输入机械功率与机端输出电磁功率不平衡而发生摇

摆^[22]。扩展等面积法则(EEAC)是一种暂态稳定量化分析的常用方法,具有快速简便,计算量小的优点,对于分群信息较明显的故障具有较好的精度^[23]。通过对多机系统进行单机等值,可以得到表征暂态稳定性的量化信息,反应暂态稳定控制措施的控制效果^[24-25]。

根据 EEAC 理论,多机系统受到扰动后,所有发电机组可以分为临界机群(S 群)和余下机群(A 群)。整个多机系统可以先被等值为一个两机系统进而再等值为一个单机无穷大系统:

$$M\ddot{\delta} = P_m - P_e \quad (1)$$

其中

$$\left\{ \begin{aligned} M &= \frac{M_s M_a}{M_s + M_a}, M_{s(a)} = \sum_{i \in S(A)} M_i \\ \delta &= \delta_s - \delta_a, \delta_{s(a)} = \frac{\sum_{i \in S(A)} M_i \delta_i}{\sum_{i \in S(A)} M_i} \\ P_m &= \frac{M_a P_{ms} - M_s P_{ma}}{M_s + M_a}, P_{ms(ma)} = \sum_{i \in S(A)} P_{mi} \\ P_e &= \frac{M_a P_{es} - M_s P_{ea}}{M_s + M_a}, P_{es(ea)} = \sum_{i \in S(A)} P_{ei} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中, M 、 δ 、 P_m 和 P_e 分别为单机等值系统的等值惯性时间常数、转子角、机械功率和电磁功率。

在故障扰动后的系统首摆暂态过程中,临界机群相对余下机群正向摇摆。调节发电机机械功率的调速器响应时间较长,通常远大于系统受到故障扰动后的功角首摆持续时间。发电机励磁调节具有快速性,于是电力系统首摆的暂态稳定问题与受扰后临界机群中发电机励磁系统的调节作用直接相关。

1.2 强励紧急控制提升暂态稳定性的基本原理

图1为电网发生常见短路故障以后,多机系统经过单机等值后的转子运动示意图。图中 P_{e1} 表示传统励磁调节下系统的有功-功角曲线, δ_1 表示发生短路故障前系统的稳态平衡点,短路时刻记为 t_1 , δ_2 为故障切除时刻 t_2 下的等值转子角,故障期间系统的加速面积 S_1 即为黑色虚线所示区域。

传统励磁调节下,由于发电机机端电压在故障清除后即恢复到较高水平,与参考电压偏差较小,励磁系统无法达到最大励磁输出,系统等值功角最大摆至 $\delta_{\max 1}$ 后于 t_{c1} 时刻回摆,对应的减速面积 S_2 由蓝色虚线表示。如果在系统故障发生的 t_1 时刻采取措施强行使临界机组的励磁输出保持最大值,短时将临界机组的机端电压进一步抬升,从而增加临界

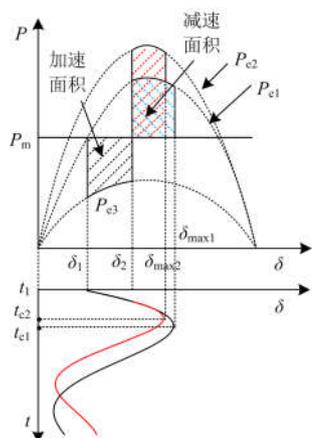


图 1 转子相对运动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of relative motion of generator rotor

机组电磁功率 P_{es} 。由式(2)中等值电磁功率计算公式可知, P_{es} 增加, 等值电磁功率 P_e 增加, 可将原本的有功-功角曲线 P_{e1} 抬升至 P_{e2} , 故障切除后的单位时间内的减速面积增加, 系统等值功角达到 $\delta_{\max 2}$ 后, 提前于 t_{c2} 时刻回摆, 此时的减速面积 S_3 由红色虚线表示。是否采取强行励磁时系统等值功角前两摆时域曲线分别如红实线和黑实线所示。显然, 采取强行励磁时的系统首摆提前结束, 功角最大值变小, 暂态功角稳定性得到提升。系统等值功角的首摆最大值 δ_{\max} 表征着系统暂态稳定程度。

需注意的是, 当系统首摆结束时, 亦即当等值功角达到首次最大值时必须结束临界机组的强行励磁, 否则会恶化后续摆次尤其是第二摆次的稳定性。强励的控制机组必须为临界机组, 若在首摆期间对余下机组强励增加余下机组电磁功率 P_{ea} , 根据式(2), 最终等值电磁功率 P_e 反而减小, 单位时间内有效减速面积也相应减小, 恶化系统暂态稳定性。

1.3 强励紧急控制的实现

发电机强励控制器框图如图 2 所示。用一个切换开关实现强励与普通励磁之间的转换, 开关的开通与关断由强励使能信号控制^[17]。红色虚线框内为静态自并励系统简化的数学模型。

当强励使能信号为高电平时, 强励控制器的开关触头置于 a 点, PSS 输出信号被屏蔽, 电压期望值 V_{des} 为固定值 V_{QL} , 考虑发电机过电压能力, 取 V_{QL} 为 1.2~1.28 p.u.。因此, 电压比较环节出现较大正偏差, 使得励磁系统输出保持为励磁顶值电压, 机端电压逐渐上升。强励结束时机端电压是否能够达到电压给定值 V_{QL} 取决于励磁系统的励磁顶值电压。励磁顶值电压越高, 机端电压在强励时更快增

加至 V_{QL} , 励磁顶值电压较低时, 机端电压在强励阶段将逐渐升高但可能不会达到期望值 V_{QL} 。

当强励使能信号为低电平时, 强励控制器的开关触头切换至 b 点, 电压期望值 V_{des} 转变为正常励磁时的给定信号, 即由稳态时的励磁参考电压附加上电力系统稳定器(PSS)输出信号。

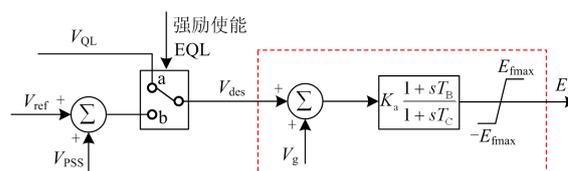


图 2 强励控制器结构图

Fig. 2 Structure of forced excitation controller

正确生成强励使能信号是强励控制器正确动作的保证。图 3 所示为利用广域量测信息及故障监测系统形成每一台发电机的强励使能信号的示意框图。

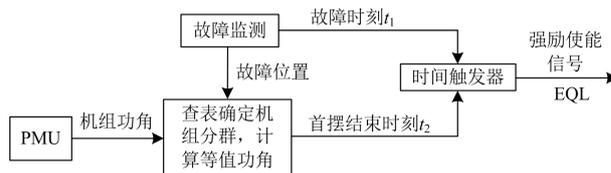


图 3 强励使能信号生成框图

Fig. 3 Generation of forced excitation enable signal

在离线的计算决策阶段, 设定各种预想故障, 仿真得出故障对应的机组分群模式, 以策略表方式存于控制系统的决策部分中。实时故障发生后, 故障监测系统监测到 t_1 时刻发生故障, 检测信号输入时间触发器触发上升沿, 输出高电平。当检测到系统大扰动时, 控制中心在已有决策表中选取与实际系统运行方式和扰动情况最接近的状态相对应的机组分群模式, 同时整合同步相量测量单元反馈的发电机实时功角, 计算系统等值功角实时曲线。控制中心记录系统等值功角首次减小的时刻为 t_2 , 忽略计算误差, 认为 t_2 即为系统首摆结束时刻。时间触发器在 t_2 时刻触发下降沿, 输出低电平, 最终强励使能信号在故障发生至系统首摆结束期间均持续高电平, 其余时段为低电平。强励使能信号输入至发电机励磁系统用于控制强励控制器切换开关, 实现对临界机组的强励紧急控制。

2 临界机组励磁顶值电压差异化配置方法

本节考虑了临界机群中不同发电机对系统调节性能差异, 利用系统暂态稳定裕度指标相对机组励

磁顶值电压的灵敏度衡量不同临界机的调节性能, 根据灵敏度大小对临界机组励磁顶值电压进行差异化配置, 更好地提升系统暂态稳定性。

2.1 系统暂态稳定裕度指标

本文所研究的系统暂态稳定性特指系统受扰后功角首摆稳定性, 主要考量系统受扰后数秒内的暂态特性, 区别于更长时间范畴下可能出现的动态稳定问题。基于 EEAC 理论得到的系统等值功角摇摆曲线的首摆最大值(在系统阻尼较好情形下通常也是功角曲线的最大值), 可直接用于表征系统的暂态稳定性。

对于一种特定预想故障, 通过延长故障切除时间, 仿真计算得到系统首摆临界稳定对应的等值功角首摆最大值, 记为 δ_r , 其余故障切除时间下的等值功角首摆最大值为 δ_u , 则该故障切除时间下系统暂态稳定裕度指标 η 计算如式(3)。

$$\eta = \delta_r - \delta_u \quad (3)$$

2.2 暂态稳定裕度相对机组励磁顶值电压的灵敏度

当励磁顶值电压变化较小时, 可近似认为系统稳态稳定裕度与励磁顶值电压存在线性关系。分别将临界机组中每一台发电机的励磁顶值电压增加 ΔE_{fmi} , 在相同故障条件下计算得到对应的系统暂态稳定裕度指标, 增量相比即为此故障情形下系统暂态稳定裕度相对对应发电机励磁顶值电压的灵敏度, 计算公式如式(4)所示。

$$\mu_i = \frac{\Delta \eta}{\Delta E_{fmi}} = \frac{\eta(E_{fmi0} + \Delta E_{fmi}) - \eta(E_{fmi0})}{\Delta E_{fmi}} = \frac{\delta_u(E_{fmi0}) - \delta_u(E_{fmi0} + \Delta E_{fmi})}{\Delta E_{fmi}}, i \in S \quad (4)$$

式中: μ_i 表示系统暂态稳定裕度相对临界发电机 i 励磁顶值电压的灵敏度; $\eta(E_{fmi0})$ 表示临界发电机 i 励磁顶值电压在初始值下的系统暂态稳定裕度; $\eta(E_{fmi0} + \Delta E_{fmi})$ 表示临界发电机 i 励磁顶值电压增加 ΔE_{fmi} (其余发电机励磁参数均为初始值)时的系统暂态稳定裕度; 每一台临界机励磁顶值电压增量扰动步长 ΔE_{fmi} 由各机组最大励磁顶值电压配置上限 E_{FMi} 按照式(5)给定。

$$\Delta E_{fmi} = (E_{FMi} - E_{fmi0}) / k, k = 3 \sim 5, k \in N \quad (5)$$

在对每一台临界机励磁顶值电压进行增量扰动后, 计算暂态稳定裕度相对不同临界机组励磁顶值电压的灵敏度, 以此衡量不同发电机对系统故障的调节能力差异性, 灵敏度越大的发电机对故障调节能力则越强, 需优先对其配置更高的励磁顶值电压, 充分发挥其调节作用。

2.3 临界机组励磁顶值电压差异化配置方法

针对某一故障, 通过灵敏度 μ_i 逐步实现临界机组励磁顶值电压优化配置流程图如图 4 所示。

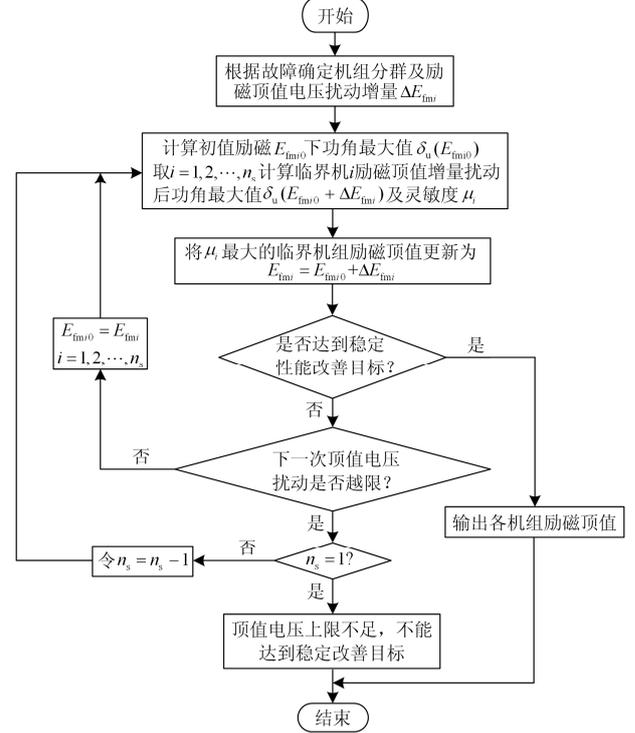


图 4 临界机组励磁顶值电压差异化配置流程图

Fig. 4 Flow chart of differential configuration of critical-generator excitation system ceiling voltage

具体步骤阐述如下。

步骤 1: 确定该故障下正确的机组分群及机组顶值电压扰动增量。通过逐渐增加故障持续时间直至系统首摆失稳, 发电机功角中最先正摆失稳的发电机构成该故障下的临界机群 S ; 根据机组最大励磁顶值电压配置限制按式(5)确定励磁顶值电压扰动增量。

步骤 2: 在初始的励磁顶值电压配置条件下计算系统暂态稳定裕度指标, 将临界机组励磁顶值电压分别增加 ΔE_{fmi} , 进行多次仿真, 计算系统暂态稳定裕度指标相对临界机组励磁顶值电压灵敏度 μ_i 。

步骤 3: 取 μ_i 最大的发电机, 对其励磁顶值电压进行更新 $E_{fmi} = E_{fmi0} + \Delta E_{fmi}$ 。

步骤 4: 判断励磁顶值电压若再增加 ΔE_{fmi} 是否会超越的设备绝缘要求上限, 若达到, 则完成该临界机的配置, 继续进行其余发电机励磁配置; 若未达上限, 令 $E_{fmi0} = E_{fmi}$ 得到下步配置的励磁顶值电压初始值。

步骤 5: 重复步骤 2 至 4, 直至系统暂态稳定裕

度指标满足期望值; 若所有发电机励磁顶值电压均达到上限依旧无法满足稳定裕度, 则需考虑加入切机切负荷等其他暂态稳定控制措施。

3 算例分析

3.1 算例系统

算例系统如图 5 所示, 该系统是在 IEEE10 机 39 节点系统基础上将 16-15 线路改造为高压直流输电(16 号母线为整流侧换流变压器高压母线, 15 号母线为逆变侧换流变压器高压母线)形成交直流混联系统。

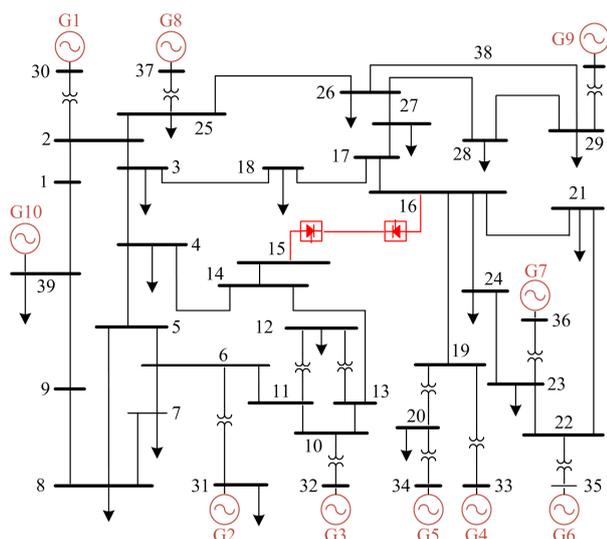


图 5 修改的 10 机 39 节点交直流混联系统

Fig. 5 Modified 10-machine 39-bus AC/DC hybrid system

发电机使用四阶模型, 负荷模型均采用简单的恒阻抗模型, HVDC 模型采用机电暂态仿真中常用的准稳态模型^[26-27]。励磁系统采用具有较高顶值电压并能够逆变产生负向电压的静态自并励系统^[1], 其简化模型如图 2 虚线框部分所示。

3.2 临界机组励磁顶值电压差异化配置

考虑的系统故障扰动为直流送端线路 21-16 靠近母线 21 处发生三相永久性接地故障。

设定初始潮流工况为: 4 台临界发电机稳态出力分别为 560 MW、580 MW、620 MW、620 MW, 线路 21-16 潮流为 558 MW。系统中所有发电机的初始励磁顶值电压均保守设定为 4 p.u., 临界发电机额定励磁电压略有差别, 但强励倍数均在 1.25~1.5 范围内。在 0.25 s 切除故障线路时, 系统等值功角首摆最大值为 129°。

若在初始励磁顶值电压下延长故障切除时间至

0.30 s, 各发电机惯性中心坐标系下的功角曲线如图 6 所示。由图 6 可见, 4 号、5 号、6 号、7 号发电机相对于其余机组较快正向摇摆最终失稳, 这 4 台发电机一同构成该故障下的临界机群, 考虑对这 4 台发电机励磁顶值电压进行优化配置。

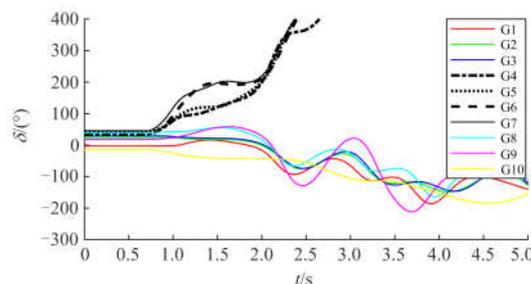


图 6 初值励磁顶值电压下各发电机相对惯性中心的功角曲线(0.30 s 切除故障线路)

Fig. 6 Power angle curve of each generator relative to the inertia center at the initial excitation top voltage (cut the fault line after 0.30 s)

在 0.25 s 切除故障线路时, 系统等值功角首摆最大值为 129°; 在临界切除时间 0.296 s 时, 求得系统等值功角首摆最大值 $\delta_r = 176.8^\circ$ 。

机组最大励磁顶值电压配置限制规定为: 最大额定励磁电压机组的强励倍数不大于 2.2 倍。考虑到各临界机最大额定励磁电压为 3.2 p.u., 按此额定电压确定最大励磁顶值电压配置限制为 7.04 p.u., 取 $E_{FMi} = 7$ p.u., $k = 3$, 相应的扰动增量 $\Delta E_{fmi} = 1$ p.u.。

按照所提方法对 4 台临界机励磁顶值电压进行配置, 预期在 0.25 s 切除故障时的系统暂态稳定裕度提升 15° 以上, 计算过程如表 1 所示。

每一计算轮次中按发电机编号顺序将临界机组的励磁顶值电压分别进行增量扰动, 将稳定裕度相对励磁顶值灵敏度最大的机组(表中以*标记)确定为正确的增量扰动, 并以此作为下一次轮次计算的初始值。

由表 1 可见, 在前 3 轮扰动计算时, 4 号发电机的励磁顶值电压对系统暂态稳定裕度灵敏度均保持最高, 通过 3 次励磁顶值电压递增, 4 号发电机励磁顶值达配置上限。因此, 在下面计算轮次中将 4 号发电机顶值确定为 7 p.u. 不再变化。后续计算中仅需对余下 3 台临界机组进行励磁顶值电压增量扰动计算。通过总共 5 轮计算, 系统等值功角首摆最大值减小至 112.5°, 暂态稳定裕度相比初值励磁顶值配置提升了 16.5°, 达到稳定裕度改善预期, 最终确定临界机组励磁顶值电压配置为

表 1 临界机励磁顶值电压差异化配置计算过程
Table 1 Calculation process of differential configuration of critical-generator excitation system ceiling voltage

计算 轮次	临界机组励磁顶 值电压/p.u.	等值功角首摆 最大值/(°)	稳定裕度相对励磁 顶值电压灵敏度
1	5、4、4、4	123.1	5.9*
	4、5、4、4	125.2	3.8
	4、4、5、4	125.3	3.7
	4、4、4、5	124.7	4.3
2	6、4、4、4	119.2	3.9*
	5、5、4、4	120.9	2.2
	5、4、5、4	121.1	2.0
	5、4、4、5	120.7	2.4
3	7、4、4、4	115.8	3.4*
	6、5、4、4	117.3	1.9
	6、4、5、4	117.6	1.6
	6、4、4、5	117.2	2.0
4	7、5、4、4	114.2	1.6
	7、4、5、4	114.5	1.3
	7、4、4、5	114.1	1.7*
5	7、5、4、5	112.7	1.4
	7、4、5、5	112.9	1.2
	7、4、4、6	112.5	1.6*

$$E_{fm4} = 7 \text{ p.u. } E_{fm5} = 4 \text{ p.u. } E_{fm6} = 4 \text{ p.u. } E_{fm7} = 6 \text{ p.u.}$$

3.3 励磁顶值差异化配置效果验证

3.3.1 对暂态稳定裕度的提升

考虑的系统故障扰动位置不变,在不同的励磁顶值电压配置方案下,0.25 s 切除故障线路时系统的暂态稳定裕度计算结果如表 2 所示,其中,方案 1 为经过本文方法得到的考虑机组性能差异性的优化配置,方案 2、3 均为对照配置,方案 2 中将灵敏度较低的 5 号机和 6 号机顶值电压进行等量提升,方案 3 则未考虑不同发电机对故障恢复的调节能力差异,统一的按照平均化思想进行励磁顶值电压提升改造。

表 2 不同励磁顶值电压配置方案下的系统暂态稳定裕度

配置方案	励磁顶值电压配置大小/p.u.				暂态稳定 裕度/度
	G4	G5	G6	G7	
1(差异化)	7	4	4	6	64.3
2	4	7	6	4	59.3
3(均一化)	5.25	5.25	5.25	5.25	61.5

由表 2 结果可知,在本文方法得到的顶值电压配置方案下,系统的暂态稳定裕度最大。方案 2 反而在灵敏度较低的机组提升励磁顶值,对暂态稳定裕度的提升效果尚且不如不考虑机组调节性能差异性的方案 3,说明按照灵敏度大小顺序进行励磁顶

值优化配置方法是合理而十分必要的,能在最小的励磁系统改造代价下最大化提升系统暂态稳定裕度。

3.3.2 对故障极限切除时间的提升

在三种励磁顶值配置方案下,预想故障导致系统首摆失稳的极限切除时间 CCT(Critical Clear Time)计算结果如表 3 所示。方案 1 的 CCT 最大,方案 3 次之,方案 2 最小,表明考虑发电机性能差异性并正确配置励磁顶值后系统暂态稳定性最好,与表 2 中用暂态稳定裕度指标分析结论是一致的。但是,CCT 相对励磁顶值电压的灵敏度数值很小,方案 1 和 3 下对应的 CCT 也十分接近,因此 CCT 指标不便于用于定量分析指导励磁顶值优化配置,只适用于验证优化配置的有效性。

表 3 不同励磁顶值电压配置方案下的极限切除时间

of excitation system ceiling voltages			
配置方案	1(差异化)	2	3(均一化)
故障极限切除时间/s	0.350	0.332	0.347

3.3.3 对联络线输送功率的提升

系统故障扰动位置不变,依旧在 0.25 s 切除故障线路,表 4 中对比了均一化与差异化方法配置励磁顶值电压时,两种潮流方式下的联络线 16-17 输送功率。若将临界机励磁顶值电压按配置方式 3 均一化配置,调整临界机组出力得到潮流方式 1,联络线 16-17 输送功率为 994.87 MW;将临界机励磁顶值电压按配置方式 1 差异化配置,调整临界机组出力得到潮流方式 2,联络线 16-17 输送功率提升至 1 079.35 MW。按发电机性能差异化配置励磁顶值电压后,电网区域联络线输送功率提升 8.49%。

表 4 不同励磁顶值电压配置方案下的联络线输送功率

潮流 方式	发电机稳态出力/MW				线路 16-17 有功 功率/MW
	G4	G5	G6	G7	
1	760	630	630	720	994.87
2	800	700	640	720	1 079.35

在两种潮流方式下分别按方案 1 和方案 3 配置励磁顶值,相同故障扰动下系统等值功角曲线对比如图 7 所示。由图 7(a)可知,潮流方式 1 下,差异化励磁配置的系统功角首摆最大值为 166.1°,均一化励磁配置下系统等值功角首摆最大值为 178.5°已达临界稳定的极限工况,而差异化励磁配置下系统仍有稳定裕度。由图 7(b)可知,4 台临界机组励磁顶值均为 5.25 p.u.时,系统因临界机群整体调节性能不足,系统等值功角持续增大,系统失稳。但是,

在方案1 差异化配置下, 系统依旧保持首摆稳定。

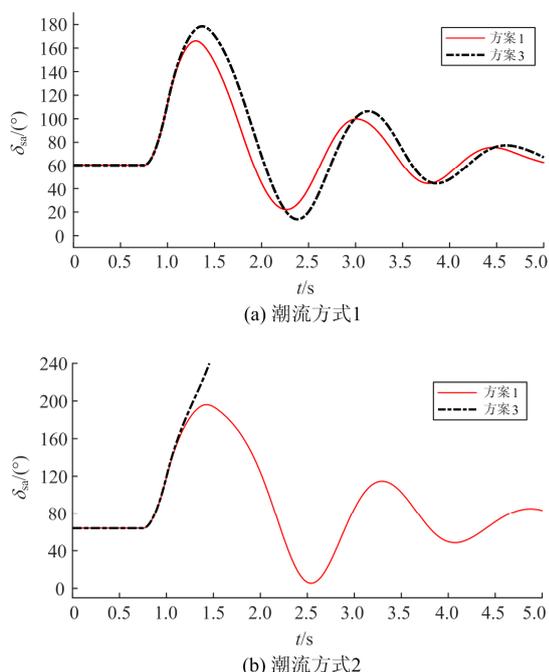


图7 不同潮流方式下的功角曲线对比

Fig. 7 Comparison of power angle under different power flows

3.4 励磁顶值差异化配置效果与故障切除时间的关系探讨

时域仿真发现, 差异化励磁顶值配置方案相对均一化配置方案, 对系统暂态稳定性的改善程度与故障切除时间直接相关, 故障切除时刻越晚, 差异化与均一化配置之间的控制性能差别也越大。

图8 列举了初始潮流方式(4台临界发电机稳态出力为560 MW、580 MW、620 MW、620 MW, 线路21-16潮流为558 MW), 在几种故障切除时间下的差异化配置相对均一化配置的控制效果差别。由图8(a)看出, 0.25 s切除故障线路时, 差异化配置与均一化配置效果差别并不显著, 系统等值功角最大值的差量为 2.8° 。由图8(b), 0.30 s切除故障线路时, 两种配置方式等值功角最大值相差 4.9° 。如图8(c), 进一步延迟故障切除时间至0.34 s时, 差异化励磁顶值配置相比均一化配置, 系统等值功角最大值的差量为 12.5° 。故障扰动越大, 差异化励磁顶值配置对系统暂态稳定性能改善效果越显著。

随着故障切除时间增加, 励磁顶值差异化配置效果更显著, 这是由强励控制的启停逻辑决定的。由于临界机组在故障发生时立即强励, 直到系统首摆结束时停止。故障后越早切除故障, 临界机组在故障期间累积的加速能量就越小, 发电机强励持续时间较短, 发电机调节性能的差异性更微乎其微。

随着故障切除时间增加, 故障期间临界机组累积更多加速能量, 发电机强励作用时间更长, 发电机不同的调节性能在时间累积下得以放大, 此时根据灵敏度信息优先增强调节性能优越的临界机组的最大强励能力, 即提升其励磁顶值电压, 可在最小的励磁设备改进代价下获得更大的系统稳定性能提升。

电网中使系统暂态失稳的严重故障情形并不是常见的, 实际工程中可针对系统薄弱环节, 预测可能发生的严重故障并有目的地对相关发电机实施差异化励磁系统顶值电压改造, 增强实际电网抵御严重故障冲击的能力。

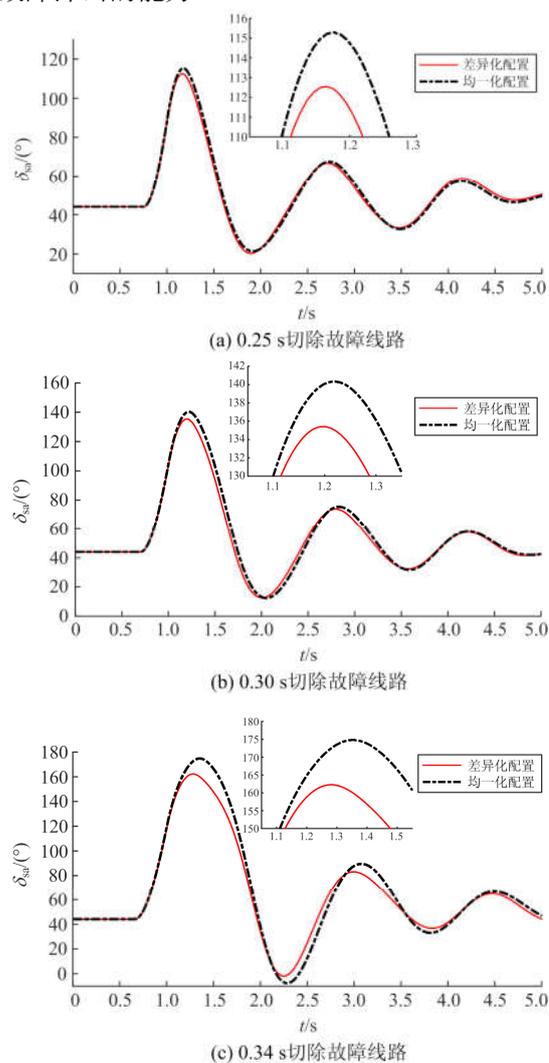


图8 不同故障切除时间下的功角曲线对比

Fig. 8 Comparison of power angle in different clearing times

4 结论

本文提出了一种考虑临界机群中不同发电机对系统暂态稳定的调节能力差异性配置励磁顶值电压的方法。通过系统暂态稳定裕度指标相对临界机组

励磁顶值电压的灵敏度衡量不同临界机的调节性能, 根据灵敏度大小对每一台临界发电机的励磁顶值电压进行优化配置, 最大化发挥其对系统暂态故障的调节能力。以修改的 10 机 39 节点交直流混联系统为例。针对系统某一严重故障, 对 4 台临界发电机进行励磁顶值电压优化配置。仿真验证了按照本文所提配置方法得到的差异化配置方案能更大程度提高系统暂态稳定性, 提升区域联络线输送功率。通过简析强励紧急控制逻辑, 说明励磁顶值差异化配置的控制效果与故障切除时间强相关。指出差异化配置励磁顶值电压后实施的强励紧急控制, 在严重故障冲击下的控制效果更显著。

参考文献

- [1] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 448-463.
- [2] 周年光, 王钦, 姚伟, 等. 发电机励磁辅环控制参数对电力系统阻尼的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 12-22.
ZHOU Nianguang, WANG Qin, YAO Wei, et al. Influence analysis of generator excitation auxiliary control parameters on power system damping[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 12-22.
- [3] ZHU Shushu, LIU Chuang, NING Yinhang, et al. A two-stage brushless excitation method for hybrid excitation synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(6): 1-11.
- [4] 黄玉龙, 刘明波. 基于单机无穷大母线等值和轨迹灵敏度的暂态稳定最优励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 89-97.
HUANG Yulong, LIU Mingbo. Optimal transient stability excitation control based on OMIB equivalents and trajectory sensitivities[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 89-97.
- [5] KHALIL Z E, ELIWA A E E S, SABRY W. A Design of a modified power system stabilizer for power system transient stability enhancement[C] // 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), 2018, Cairo, Egypt: 712-717.
- [6] 郭磊, 张英敏, 李兴源. 基于改进射影控制的互联系统附加励磁控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 8-14.
GUO Lei, ZHANG Yingmin, LI Xingyuan. Supplementary excitation controller design of interconnected power system based on modified projective control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 8-14.
- [7] 孙士云, 束洪春, 唐岚, 等. 强励对交直流混合输电系统暂态稳定裕度的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 35-39.
SUN Shiyun, SHU Hongchun, TANG Lan, et al. Influence of forced exaction on transient stability margin of AC/DC hybrid power transmission system[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 35-39.
- [8] TAYLOR C W, MECHENBIER J R, MATTHEWS C E. Transient excitation boosting at Grand Coulee third power plant, power system application and field tests[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(3): 1291-1297.
- [9] WANG Y, HIN D J, GAO L, et al. Transient stability enhancement and voltage regulation of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(2): 620-627.
- [10] 常海军, 霍超, 刘福锁, 等. 提高弱送端电网暂态电压稳定水平的调相机优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 90-95.
CHANG Haijun, HUO Chao, LIU Fusuo, et al. Research on optimal allocation method of synchronous condensers for improving transient voltage stability level of weak sending-end power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 90-95.
- [11] 黄大可. 大型水电机组第 3 代励磁系统展望[J]. 水电厂自动化, 2012, 33(1): 19-23.
- [12] 吴跨宇, 陈新琪, 孙维真, 等. 发电机励磁系统强励功能分析与核算[J]. 浙江电力, 2012, 31(7): 15-18, 23.
WU Kuayu, CHEN Xinqi, SUN Weizhen, et al. Analysis and check on forced excitation function of generator excitation system[J]. Zhejiang Electric Power, 2012, 31(7): 15-18, 23.
- [13] 解兵, 徐珂, 刘建坤, 等. 励磁调节器低励限制整定原则和整定方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 142-147.
XIE Bing, XU Ke, LIU Jiankun, et al. Study on the principle and setting method of low excitation limit setting for excitation regulation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 142-147.
- [14] 周晓渊, 邱家驹, 陈新琪. 高压侧电压控制对单机-无穷大系统稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 60-63.
ZHOU Xiaoyuan, QIU Jiaju, CHEN Xinqi. Effects of high side voltage control on stabilities for one machine infinite bus[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 60-63.
- [15] KOSTEREV D. Design, installation and initial operation experience with line drop compensation at John Day Power house[J]. IEEE Transactions on Power Systems,

- 2001, 16(2): 261-265.
- [16] DAVIES J B, MIDFORD L E. High side voltage control at Manitoba Hydro[C] // Proceedings of 2000 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 16-20, 2000, Seattle, WA, USA: 2000.
- [17] 陈新琪, 俞鸿飞, 卢嘉华, 等. 电力系统电压调节器原理及试验分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 92-96. CHEN Xinqi, YU Hongfei, LU Jiahua, et al. Principle and testing of power system voltage regulator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 92-96.
- [18] 黄弘扬, 徐政, 华文, 等. 基于广域测量系统的发电机强励控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 49-56. HUANG Hongyang, XU Zheng, HUA Wen, et al. Forced excitation control scheme based on wide-area measurement system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 49-56.
- [19] 潘荣超, 刘念, 黄大可, 等. 新型叠加强励励磁变压器的参数优化[J]. 变压器, 2014, 51(11): 10-13. PAN Rongchao, LIU Nian, HUANG Dake, et al. Parameter optimization of excitation transformer for new type superposition strong excitation system[J]. Transformer, 2014, 51(11): 10-13.
- [20] 李顺, 刘念, 潘荣超, 等. 新型叠加强励励磁回路的电磁暂态特性与励磁变压器容量分析[J]. 电测与仪表, 2014, 51(11): 50-55. LI Shun, LIU Nian, PAN Rongchao, et al. Analysis on electromagnetic transient characteristics of new type superposed forced excitation circuit and excitation transformer capacity[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(11): 50-55.
- [21] 周云, 严正, 李乃湖, 等. 多机系统发电机组强励电压倍数优化配置算法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 113-121. ZHOU Yun, YAN Zheng, LI Naihu, et al. Optimal FEVR configuration of generation units in multi-machine power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 113-121.
- [22] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖, 等. 动态电力系统理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [23] ZHANG Y, WEHENKEL L, ROUSSEAU P, et al. SIME: a hybrid approach to fast transient stability assessment and contingency selection[J]. Electrical Power & Energy Systems, 1997, 19(3): 195-208.
- [24] NEDOLIVKO A V, BELYAEV A N. Improvement of transient stability analysis methods in verification of wide area control systems for long-distance AC interconnection[C] // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW), February 2-3, 2016, St. Petersburg, Russia: 629-632.
- [25] 滕林, 刘万顺, 賁志皓, 等. 电力系统暂态稳定实时紧急控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 65-70. TENG Lin, LIU Wanshun, YUN Zhihao, et al. Study of real-time power system transient stability emergency control[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 65-70.
- [26] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [27] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.
-
- 收稿日期: 2019-07-05; 修回日期: 2019-11-21
- 作者简介:
- 张志杰(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交直流混联网稳定性分析与控制; E-mail: zhijie_sgo@hust.edu.cn
- 姚伟(1983—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为大电网稳定性分析与控制、柔性直流输电系统及其控制等。E-mail: w.yao@hust.edu.cn
- (编辑 姜新丽)