

计及定值配合的发电机与励磁系统保护协同策略研究

吴广生

国家电投集团贵州金元股份有限公司纳雍发电总厂，贵州 毕节 553303

DOI:10.61369/EPTSM.2026020026

摘 要： 本文针对现代大容量、高参数复杂互联电力系统中发电机发变组保护与励磁系统限制功能存在保护重叠、定值配合失当问题，开展计及定值配合的二者保护协同策略研究。首先，界定励磁系统限制“主动预防、维持运行”与发变组保护“被动隔离、兜底防护”的功能本质，确立“分层防御、限制优先、保护后备”协同原则；接着，围绕转子过热、定子过热、过激磁、失磁预防四大关键保护面，从启动值、发热常数、动作时间等维度构建定值配合数学模型与整定方法，设置合理定值级差保障“限制先动、保护后动”；最后，建立整定计算标准化流程，提出反时限特性曲线对比、P-Q平面叠加分析两种可视化验证方法，并给出工程常见问题及对策。该协同策略可为相关保护定值整定提供理论与工程指导，对提升发电机运行安全性和电网暂态支撑能力有重要价值。

关 键 词： 发电机保护；励磁系统；定值配合；协同策略；反时限特性；限制与保护

Research on the Protection Coordination Strategy of Generator and Excitation System Considering the Value Setting

Wu Guangsheng

Guizhou Jinyuan Co., LTD. Nayong Power Plant, State Power Investment Group, Bijie, Guizhou 553303

Abstract： This study investigates protection coordination strategies for generator-transformer units (GTUs) in modern large-capacity, high-parameter interconnected power systems, addressing issues of protection overlap and improper setting coordination in excitation system restrictions. First, it clarifies the functional essence of excitation system restrictions ("active prevention and operational maintenance") versus GTU protections ("passive isolation and last-resort protection"), establishing the principle of "tiered defense, restriction priority, and protection backup." Next, it constructs mathematical models and setting methods for four critical protection aspects—rotor overheating, stator overheating, over-excitation, and loss of excitation—by defining activation thresholds, heating constants, and action durations, with reasonable setting differentials ensuring "restriction activates first, protection follows." Finally, it establishes standardized setting calculation procedures, proposes two visual validation methods (inverse time characteristic curve comparison and P-Q plane superposition analysis), and addresses common engineering challenges with countermeasures. This coordinated strategy provides theoretical and practical guidance for protection setting optimization, significantly enhancing generator operational safety and grid transient support capabilities.

Keywords： generator protection; excitation system; setting coordination; collaborative strategy; inverse time characteristic; limitation and protection

引言

现代电力系统向大容量、高参数、复杂互联发展，大型同步发电机安全稳定运行是电网电压与频率稳定的核心保障^[1]。发电机短时过载能力是维持系统暂态稳定的重要资源，需控制在设备热承受极限内^[2]。发变组保护与励磁系统保护限制功能是保障发电机安全的两大核心技术体系，分别承担故障隔离“最后防线”与预防性调节作用，但在转子过负荷等保护方面存在功能重叠，定值配合失当会引发严重问题，且现有研究缺乏系统层面协同策略体系构建^[3]。为此，本文旨在建立计及定值配合的发电机与励磁系统保护协同策略，为工程实践提供指导。

一、发电机与励磁系统保护的功能界定与协同原则

（一）功能本质界定

励磁系统限制与发变组保护虽都旨在保障发电机安全，但技术属性、动作目标及后果差异显著^[4]。前者是发电机自动控制闭环一部分，集成于数字式励磁调节器，实时采集电气量经算法判断，在运行点触及或预判触及预警边界时主动干预 AVR、调整励磁电流，以调节输出、告警为主，不直接解列发电机，核心是预防性维持机组连续运行；后者属电力系统二次保护，由独立装置实现，监测发变组电气量与非电量，检测量超出跳闸边界且满足时间条件时判定故障，发出跳闸指令、隔离故障设备，核心是作为终极后备防止设备损坏扩大^[5]。

表 1：励磁系统限制与发变组保护功能对比

对比维度	励磁系统限制功能	发变组保护功能
技术属性	自动控制系统的一部分	继电保护系统的一部分
动作目标	预防异常，维持运行	切除故障，隔离设备
动作后果	调节励磁、发信	发信、减出力、跳闸
动作速度	相对较快，旨在快速抑制	按整定时限，可能较快或带延时
整定依据	设备过负荷能力，留有一定裕度	设备安全极限，考虑损坏边界
功能关系	第一道防线，先行动作	最后一道防线，后备动作

二、关键保护面的定值配合协同策略

（一）转子过热保护协同

1. 原理与标准要求

系统电压跌落时，发电机强励维持电压稳定，致转子电流短时远超额定值，转子绕组发热加剧。《GB/T7064-2008》规定了汽轮发电机转子绕组反时限过电流耐受特性，本质是绕组发热量 $(I^2 \cdot t)$ 积累与散热过程。标准以发热常数 $C=33.75$ 为基准，可用统一公式描述。

$$(I_f^2 - 1) \cdot t = C \quad (1)$$

式中： I_f 为以额定转子电流为基准的标么值； t 为允许持续运行时间（秒）； C 为转子绕组发热常数。

励磁系统强励反时限限制（过励磁电流反时限限制）功能模拟并执行该特性，转子电流超标时启动积分，累计发热量达设定值（ C 值）减磁。发变组保护的转子过负荷保护依此反时限特性，作为转子过热后备保护。《GB14285-2006 继电保护技术规程》要求，300MW 及以上发电机应配置由定时限（告警）和反时限（跳闸）组成的励磁绕组过负荷保护。

2. 定值配合策略与数学模型

（1）启动值（Threshold）配合

励磁限制启动值 $I_{f.Let}$ ：考虑额定工况励磁电流波动（105%~110%）及采样误差，以及采样误差，整定为1.05~1.10p.u.。

保护启动值 $I_{f.Pet}$ ：为预留限制功能先行动作区间，取值大于励磁限制启动值，工程经验取其1.05~1.1倍。即：

$$I_{f.Pet} = (1.05 \sim 1.10) \times I_{f.Let} \quad (2)$$

例如，若 $I_{f.Pet}=1.05$ ，则 $I_{f.Let}$ 宜设在1.10~1.15之间。

（2）发热常数（ C 值）配合

发热常数 C 决定反时限曲线形状，为使保护曲线位于限制曲线之上（相同电流下允许时间更长），保护 C 值不小于标准值且大于等于限制 C 值。

励磁限制 C 值 C_L ：为保障限制先动，取值略小于标准值33.75，如30~33。相同过流工况下限制允许时间 t_L 更短。

保护 C 值 C_P ：取值等于或略大于标准值33.75，如33.75~35。配合关系为：

$$C_P \geq C_{std} \geq C_L \quad (3)$$

其中， $C_{std}=33.75$

（3）级差计算与验证

“级差为同一过流倍数下，保护动作时间与限制动作时间的差值，是配合有效性的量化指标。

由公式(3.1)，同一电流倍数 I_f ，动作时间分别为：

$$t_L = \frac{C_L}{I_f^2 - 1}, \quad t_P = \frac{C_P}{I_f^2 - 1} \quad (4)$$

则级差 Δt 为：

$$\Delta t = t_P - t_L = \frac{C_P - C_L}{I_f^2 - 1} (I_f > 1) \quad (5)$$

级差需为正，且顶值强励电流（1.8~2.0倍额定值）工况下，时间裕度应不小于0.5秒。

（二）定子过热保护协同

1. 原理与标准要求

定子绕组过热主因是对称过电流，《GB/T7064-2008》规定其短时过电流耐受特性，发热常数 $C=37.5$ 。容量 ≤ 1200 MVA 的发电机需耐受1.5倍额定电流至少30秒。反时限特性满足

$$(I_s^2 - 1) \cdot t = C \quad (6)$$

式中： I_s 为以额定定子电流为基准的标么值。

励磁系统定子电流限制功能，通过调节励磁（减磁降低无功与机端电压，间接减小定子电流）预防过热，发变组定子过负荷（过电流）保护作为后备。

2. 定值配合策略

定子侧定值配合策略与转子侧相似，核心是启动值和发热常数（ C 值）的阶梯化整定。定子电流限制启动值要躲过正常波动，通常设为1.0~1.05p.u.，而定子过电流保护的定时限告警段或反时限启动值略高，为1.05~1.10p.u.。在 C 值配合上，定子标准 C 值为37.5，为使励磁限制先动作，其 C 值可取33.75~37.5（如33.5），且一般不小于转子限制 C 值，防止定子限制过早减磁影响系统电压恢复，保护侧采用标准 C 值37.5。此外，由于励磁系统实现有差异，并非所有型号都标配定子电流限制功能，部分装置需升级程序，参数可能通过临时变量设置，整定配合前要先确认

该功能是否存在^[7]。

(三) 过激磁保护协同

1. 原理与配合目的

发电机与主变压器铁芯当中的磁通密度 B 跟机端电压 U 成正比, 和频率 f 成反比, 也就是 $B \propto U/f$, 过激磁讲的是 U/f 比值过高, 使铁芯饱和, 致使涡流损耗以及异常温升都急剧增加, 对设备有危害, 伏赫兹限制乃励磁系统所拥有的功能, 运用检测 U/f 比值, 当超出限制时自动把电压给定降低, 以此防止过激磁。过激磁保护属于发变组保护的功能, 在所运用 V/Hz 限制失效或者过激磁太过严重的时候进行动作跳闸^[8]。

2. 定值配合策略

(1) 动作值配合

动作值配合方面: 借助多道防线的方式来进行动作值的配置, 使其能逐级得到提升, 第一道防线是 V/Hz 限制动作值 N_L , 其整定值处于 1.05 到 1.10 p.u. 这个范围, 比如宝庆电厂 #1 机就选用了 1.06 p.u. 作为该值, 低于设备长期所允许的过激磁能力, 以此能实现对设备状况的及早干预。第二道防线是过激磁保护告警值 $N_{p_{alarm}}$, 此值的整定值大约是 1.10 p.u., 会带着长延时发信。第三道防线为过激磁保护跳闸值, 它分成定时限与反时限这两类, 其中定时限跳闸值 $N_{p_{rip}}$ 选取 1.25 p.u. 左右, 依靠延时跳闸的方式来应对严重的过压情况。反时限跳闸下限值 $N_{p_{rip2min}}$ 取得 1.08 p.u., 该下限值与上限值共同构成反时限曲线, 以应对持续的中等过激磁状况, 保证设备能在不同的过激磁程度下可有相应合适的保护动作。配合关系为:

$$N_L < N_{p_{alarm}} \leq N_{p_{rip2min}} < N_{p_{rip}} \quad (7)$$

(2) 动作时间配合

V/Hz 限制动作的时间 t_L 得快速响应, 用来迅速抑制过激磁, 过激磁保护告警延迟时间比较长, 反时限曲线会依据过激磁倍数去调整时间, 1.08 倍的时候允许的时间特别长, 到了 1.25 倍时允许的时间非常短。

(3) 低频特殊策略

当频率低于整定阈值 (如 45 Hz) 时, U/f 比值易越限且危害加剧, V/Hz 限制策略需切换: 空载工况下直接启动逆变灭磁, 负载工况下则与保护配合, 经短延时跳闸。

(四) 失磁预防协同

1. 原理与配合挑战

发电机欠励运行, 也就是吸收系统无功, 要是进相过深, 会触发失步以及定子端部过热的问题, 欠励限制功能借助实时有功 P 跟无功 Q 在 $P-Q$ 平面设定动作边界, 运行点触及边界之际, 就会增加励磁电流来阻止深度进相, 而失磁保护则按照机端阻抗轨迹进入“静稳边界圆”或者“异步边界圆”来判定故障并且跳闸。核心配合挑战是二者选用了不一样的描述坐标系, 限制功能采用 $P-Q$ 平面, 保护功能运用了阻抗平面, 很难直接开展整定配合工作^[9]。

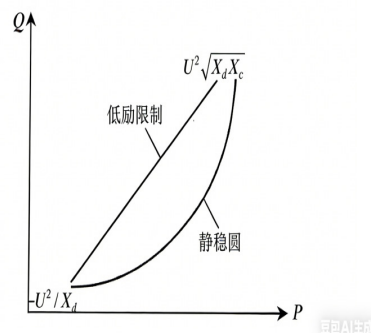
2. 定值配合策略与数学模型

(1) 欠励限制边界整定

欠励限制边界依据发电机制造厂进相试验数据确定, 计入静

稳储备系数与误差后, 形成 $P-Q$ 平面第二象限内的曲线或折线, 直线型方程为:

$$Q = kP + (aU^2 + b)Q_0 \quad (8)$$



式中 k , a , b , Q_0 为常数, U 为机端电压标么值。该边界应随电压 U^2 变化, 以覆盖不同电压下的安全区域。

(2) 保护边界映射与配合

为解决坐标系不统一状况, 应当把失磁保护的阻抗圆映射到 $P-Q$ 平面。

静稳极限阻抗圆映射: 设定系统阻抗是 X_s , 发电机同步电抗为 X_d , 经过推导可得出 $P-Q$ 平面动作圆方程:

$$P^2 + \left[Q - \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_s} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 > \left[\frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_s} + \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \quad (9)$$

圆外为动作区。

异步边界阻抗圆映射: 圆心在 $-X_d/2$, 半径为 $X_d/2$, 映射后方程为:

$$P^2 + \left[Q + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{0.5X_d'} + \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 < \left[\frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{0.5X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \right]^2 \quad (10)$$

圆内为动作区。其中 X_d' 为发电机暂态电抗。

(3) 配合原则与可视化验证

在 $P-Q$ 平面当中, 当发电机运行点从第一象限正常区朝着第二象限进相区进行移动的时候, 需要依次去穿越四层安全边界, 其核心原则是欠励限制曲线要全部处于静稳极限圆与异步圆的外面, 并且要预留出足够的裕量。

三、协同策略的工程实施与验证

(一) 整定计算标准化流程

基于协同策略, 新建及改造机组整定计算标准化流程为: 收集核心技术数据, 明确“限制先动, 保护后动”原则及目标级差; 分项完成转子、定子、 V/Hz 、欠励/失磁的定值整定; 汇总校验定值协调性后, 形成正式定值单。

(二) 可视化验证方法

可视化验证是校验定值配合策略有效性的关键, 可将抽象模型与参数转化为几何图形, 直观呈现励磁限制与发变组保护的逻辑、时序关系及安全裕度, 核心方法为两种: 一是反时限特

性曲线对比法，用于热累积模型配合校验，通过同一坐标系曲线对比明确动作级差与运行区；二是 P-Q 平面叠加分析法，解决欠励限制与失磁保护配合问题，转化判据并叠加曲线形成层次化图形^[10]。工程中可借助 MATLAB、Python 等工具实现，为“限制先动、保护后动”策略提供直接验证依据。

（三）常见问题与对策

工程实践中实施协同策略面临三类典型挑战及对应对策：一是旧励磁装置缺乏完整限制功能，优先升级控制软件，无法升级则采用保守定值并强化运行监视；二是不同厂商励磁调节器限制算法与标准特性存在差异，需钻研技术手册、寻求厂家支持，推动算法契合标准模型；三是定值变更管理不严谨易破坏配合关系，需建立严格管理制度，确保定值修改经全面评估与联合校验，为协同策略可靠实施奠定基础。

四、结论与展望

本文围绕计及定值配合的发电机与励磁系统保护协同策略展开研究，明确二者“主动调节预防”与“被动故障切除”的功能本质及“限制先动、保护后动”原则，提出核心定值配合实施路径，建立四大关键保护面的数学模型、整定方法，结合多维度验证证实策略有效性，总结标准化工程流程以指导实践。展望未来，依托智能电网与高比例新能源接入趋势，协同策略将向自适应保护等方向发展，通过完善行业导则、开发集成化工具，提升防护精准性与效率，为电力系统提供技术支撑。

参考文献

[1] 牛伟, 康志林, 齐家伟, 等. 可控两相零式电抗分流发电机励磁系统仿真研究 [J]. 电器工业, 2025(6): 29-35.
[2] 尹昕. 船舶同步发电机励磁系统设计与动态响应特性分析 [J]. 消费电子, 2025(22): 95-97.
[3] 刘超. 发电机励磁系统改造及调试研究 [J]. 电气技术与经济, 2025(11): 178-181.
[4] 李生虎, 朱争高, 齐楠, 等. 计及调速 / 励磁系统的同步发电机等效惯量辨识 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(10): 18-25.
[5] 陆青卓. 基于云计算的发电机励磁系统故障检测系统设计 [J]. 电气技术与经济, 2025(6): 304-306, 311.
[6] 汤雪飞. 发电机励磁系统的智能化发展路径探究 [J]. 张江科技评论, 2025(9): 38-40.
[7] 彭志才. 水轮发电机效率提升关键技术分析 [C]// 新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集 (一). 2025.
[8] 黄铀旻. 船舶全电推进系统和轴带发电机的智能能效管理及协同优化研究 [J]. 消费电子, 2025(12): 73-75.
[9] 江博游, 徐华廷, 郭创新, 等. 计及决策依赖不确定性和禁止转速区间的频率约束风火协同备用优化模型 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(23): 9213-9224.
[10] 汪宇航, 李琰, 应飞祥, 等. 计及可靠性成本的风光储微电网储能容量协同优化 [J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 59-65.