

基于系统概率稳定性下的发变组无GCB保护跳闸分析

从国外电网无GCB下发电机跳闸的重要性着手，结合发电厂和电网稳定性进行分析；通过在印尼孤电网小容量特定情况下，进一步论述GCB和发电机跳闸系统安全可靠运行的重要意义。运用无GCB系统风险分析，发电机出口、线路及系统保护跳闸形式和失灵保护来分析系统风险，并引入概率工具进行分析，实现了设计和投资决策阶段无GCB时对系统稳定概率的关注，实现了在实际调试和运行阶段对临界切除时间的关注，从而保证电网和发电厂稳定可靠运行，以期获得最大收益。

陈伟/中国水电顾问集团国际工程有限公司
肖莞/华北电力大学电气与电子工程学院



陈伟/高级工程师

在境外BOT（建设—经营—转让）项目中，若节省发电机出口断路器（GCB），将引起发电机保护跳闸出口Lockout继电器来直跳GIS 150 kV 3/2接线的串中和串底边断路器，因此发电机出口跳闸有两种方式：一是节省二次硬件，用继电器扩展来实现；二是从系统安全性方面考虑，发电机出口Lockout继电器直接跳闸中断路器。最后，基于发电机出口跳闸失灵，通过断路器失灵保护作为最后防线，联跳对侧线路断路器。

稳定性是电力系统规划、设计、运行和控制中需考虑的问题。传统的稳定性分析是基于系统的元件参数、运行条件干扰方式均给定的情况下进行的，属于确定性稳定分析；对于随机性问题，提出电力系统概率稳定分析，根据系统中影响稳定的主要随机因数的统计特征来确定电力系统的概率稳定指标，是电力系统稳定性分析从确定型到概率型的一次突破。

本文从发电厂及系统角度研究以下几

方面的问题。从成本和系统安全性的角度来分析确立BOT项目经济平衡点^[1-3]；在无GCB下分析发电厂及电网风险，以及论述GCB对发电厂稳定性的意义；同时通过无GCB下发变组保护跳闸，线路及系统保护跳闸形式和失灵保护试验量化分析，结合保护配置，运用概率工具对事故的概率分析引申到系统整体安全性评估。

本文解决了无GCB下发电机跳闸控制及其系统安全脆弱性分析，通过对比不同电力系统中不同的保护配置，并结合试验数据分析，用概率工具来分析系统安全性，找到成本最小化、收益最大化的系统安全、成本的平衡点。

无GCB下发电机跳闸的重要性

在电力系统规划设计中，基本要求是使系统在安全及节省投资的同时满足用户供电需求。在新装投资设备时常考虑不确定的负荷需求不能满足时的经济损失，并与发电机、GCB等投资相比较，从而确定投资策略；在运行阶段，在满足安全（用概率稳定指标衡量）的前提下寻找最经济的全局运行策略。故在设计阶段必须考虑可靠性。下面分别从发电厂和电网稳定性、可靠性角度来进行分析。

1. 从发电厂安全稳定性角度理解

从购电合同角度考虑：电网需要稳定电源点；对于电网中较大的机组，要严格控制起停机次数。发电机变压器组（以下简称“发变组”）保护必

关键词/Keywords

Lockout出口继电器·
GIS 串中断路器·
失灵保护·
概率稳定分析·

须用响应快，且安全保障好的快速型输出闭锁（Lockout）出口继电器直接跳闸线圈三相；跳闸节点容量必须满足跳闸，若不直接出口跳闸，回路故障或断路器失灵延时较长，则无法及时跳闸并与系统解列；保护跳闸的重要意义在于：如发电机无法与系统可靠断开，将引起严重后果，造成发电机反转；电网低频高频时，导致汽轮机超速或锅炉保护频繁动作，引发电网剧烈波动甚至瘫痪。

2. 从电网可靠稳定性角度理解

外方电网需求：发变组、起动备用变压器保护Lockout继电器跳闸出口数量需满足去就地三跳中断路器；在跳申中、串底断路器不动作工况时，断路器失灵保护跳相邻断路器，并经PLC远传节点跳对侧断路器，用牺牲系统稳定性的方法实现故障机组解列，解列程度与GIS运行方式有关。

3. 现场结论

增加发变组及起备变保护Lockout继电器。对

于失灵保护，发变组保护通过Lockout节点经操作箱跳150 kV断路器，若断路器拒动，则断路器失灵保护作为最后防线，保证故障区域可靠切除。

综上所述，在节省发电机出口断路器及配置线路保护较弱时，若不深入研究重要主回路控制，将会造成难以预料的后果。下面基于发电机出口跳闸主回路的重要性，通过试验来详细分析系统的稳定性。

系统稳定性分析

在概率稳定性评估中需模拟各种故障类型、主保护、后备保护、重合闸动作和各种控制的影响。在电力系统暂态分析中的重要指标是系统的稳定概率及临界切除时间的概率分布。

1. 机组无GCB的技术分析

表1为机组无GCB的技术分析统计。

上述分析是从运行安全性的角度进行分析的，从可靠性的经济决策角度进行分析如表2所示。

表1 无GCB的技术分析

对象/风险因数	缩短故障恢复时间及提高机组可用率	发电机转子的损害	主变压器及厂用变压器故障
电网方面	在系统振荡时，用GCB使机组与系统解列，不失去厂用电源	在一般情况下，由于主变压器、厂用变压器故障或高压开关非全相操作都将损坏发电机转子	电网故障后，在GCB动作时间小于75 ms（连同保护动作时间）内，变压器有损坏的风险
厂用系统	由于GCB可在不失去厂用电源的条件下切除发电机内部故障，保证了故障情况下的安全停机 经计算，采用GCB可使发电厂的可用率提高0.7%~1%	IEC—Recommendation34—1（1983）中需衡量各种不平衡负荷是否超出发电机的承受能力。大型发电机均有一定承受负序电流的能力	GCB对限制发电机转子因不平衡负荷而过热损坏及主变压器内部故障有非常大的作用 GCB可避免厂用电切换的风险，能简化机组继电保护接线，可缩短故障恢复时间，提高发电厂可用率
有无GCB	采用GCB，选择性实现发电机、变压器保护跳闸，且多数保护无须动作高压断路器，避免厂用电失去		给出故障发生在变压器内不同位置时的结果。 若无GCB，则90%的内部故障在180 ms以内将引起变压器爆炸

2. 基于有无GCB下发变组保护及线路保护跳闸系统试验安全性分析

根据表1中无GCB风险中主变压器及厂用变压器故障时间区间[75 ms，180 ms]分析故障程度。在无GCB情况下，对厂内发变组、线路保护跳闸及联跳系统进行试验分析，获取试验数据，全面分析系统的安全性。

在电力系统暂态稳定分析中，计算临界故障切除时间，如表2所示。当断路器动作时间小于

临界故障切除时间时，系统稳定；反之系统不稳定。通过判断故障后系统能量裕度来确定系统是否失稳。直接法从能量角度看稳定问题，不能替代时域仿真法，两者相辅相成。在离线分析时，可用直接法做筛选工具，先在简单模型下选出稳定度最差事故，以便进一步作精细的时域分析。

在印尼小电网特殊情况下，机组发变组及线路跳闸方式和切除故障时间对厂网安全稳定运行有重要意义，在设计和投资阶段应把握好，并且

表2 各保护动作时间（继电器和回路延时）

项目及保护	影响因素	发变组 保护试验	线路保护继电	系统联跳时间	动作时间合计	故障时可能	结论
			器、扩展继电	（载波远传节		点远跳）、对	
			器时间和回	侧跳闸时间			
			路跳闸时间				
	</						

在实际调试和运行过程中应予以关注。

3. 无GCB下发变组保护跳闸系统可靠性分析

在无GCB、节省一次设备投资情况下，深入二次控制回路的选取和设置研究有非常重要的意义，发电机出口跳闸需不经扩展的去直跳与之相连的GIS串中、串底断路器；当跳闸失败时，启动失灵保护，跳与之开关相邻断路器：对串中断路器跳闸串顶和远传节点跳对侧变电站线路出口断路器，对于串底断路器则跳闸与之相连的母线上的

所有断路器。在印尼小电网下，由于GIS运行方式不同，发电厂几台机组同时甩负荷，造成大面积停电甚至电网瘫痪，如表3所示。

若干项目发变组及线路保护（含远跳）系统可靠性、安全性及事故概率对比分析

电力系统可靠性分析法分为两类，即确定性和概率性方法。

在工程应用中全面评价一个项目的系统可靠

表3 系统稳定性与GIS型式、GCB的关联

对象	系统稳定性	开关站型式，出口断路器	GIS运行方式	关联点
电网方面	A 非常稳定	1/2接线，有出口断路器	典型运行方式，环网	甩负荷及对电网和其他机组影响小，出口断路器不动作，失灵保护跳出口断路器下级的开关站内的断路器
	B 比较稳定	1/2接线，无出口断路器	非环网运行方式	甩负荷及对电网和其他机组有一定影响，开关站内断路器不动作，失灵保护跳闸对侧开关站断路器
	C 不稳定	双母接线，无出口断路器	环网运行方式	甩负荷及对电网和其他机组有效大影响，开关站内断路器不动作，失灵保护跳闸对侧开关站断路器

性及事故概率评价，对系统可靠性、安全性应在确定性小、概率性大的系统中分析，方法为先从宏观因素进行分析，再进行量化分析。

1. 基于风险的脆弱性评估原理

对于小系统和大系统来说，通常采用两种不同的方法，即解析法和模拟法。解析法将元件或系统的寿命过程化、理想化，并用一数学模型来描述这一寿命过程，如用指数分布，再计算得到需要的可靠性指标；模拟法在计算机上模拟出上述寿命过程的实际实现，并通过对此模拟过程若干时间来观察，预计所要求的可靠性指标。模拟法是将模拟过程当作系统的真实试验来处理，典型的模拟法为蒙特卡罗模拟法。

解析法用较严格的数学模型和一些算法对系统可靠性进行周密分析，准确性高，常用于发电系统和一些简化的小型组合系统的可靠性评估，如互联发电系统等。但对于大型组合电力系统，需要考虑的因素很多，如发电机、变压器、输电线路、母线、断路器和继电保护等，还要考虑发电机组的检修安排和降额运行状态等。

(1) 基本原理和计算公式

定量把握事故发生的可能性和严重性这两个系统脆弱性的决定因素，在考虑电力系统脆弱性评估的风险指标时，将系统脆弱性风险指标定义为事故发生的概率与事故产生后果的乘积，即

$$R(Y_i/E_i,L)=\sum P(E_i)P(Y_i/E_i,L)S(Y_i) \tag{1}$$

式中， Y_i 为特定的运行状态； E_i 为未来时刻 t 发生的不确定事故； L 为时刻 t 时系统的负荷状况； $P(E_i)$ 为 E_i 发生的概率； $P(Y_i/E_i,L)$ 为发生事故 E_i 后系统运

行状态的概率分布； $S(Y_i)$ 描述了在状态 Y_i 时事故的严重程度； $R(Y_i/E_i,L)$ 为风险指标值。

(2) 事故发生概率

从事故统计数据可以看出，电力系统发生事故的的概率基本符合泊松（Poisson）分布，即

$$P(E_i)=(1-e^{-\lambda_i})\times e^{-\sum \lambda_j} \quad j\neq i \tag{2}$$

式中， λ_i 为可能为事故 E_i 的发生率。

(3) 风险的分解与组合

风险按每一类安全性问题、每一起事故和每一个元件来计算，故可将对系统整体的风险评价分解为对各类安全性问题的评价，并相应地改写式

(1)，计算不同类型的脆弱性风险指标值，以反映系统脆弱性问题的不同方面。将这些风险指标进行综合，即可得到反映系统整体脆弱性的风险指标^[4]，如下图所示。

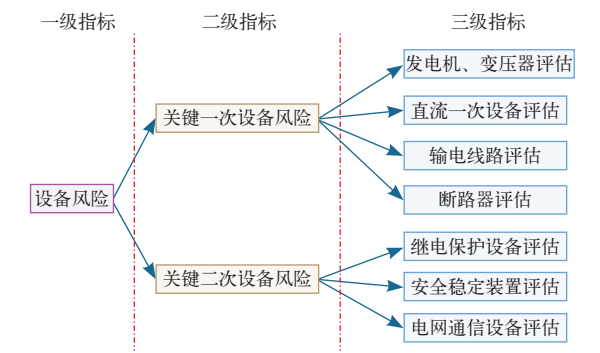


图 印尼电力系统的设备安全风险评估指标体系图^[5]

为此，引入事故发生概率的概念，用其数量级进行对比分析。本例与其他两个项目中的系统可靠性进行对比分析，如表4所示；根据式（2）进行事故发生概率对比分析，如表5所示。

本例先从线路保护配置的主、后备保护和保

表4 若干项目系统可靠性分析对比表

对象	系统 安全性	开关站型式， 出口断路器	线路保护（含远传），发变组保护配置	关联点	事故发生概率 $P(E_i)$ （数量级）	
电网 方面	A项目	非常 稳定	3/2接线，有出口断路器	线路主保护为2套光纤距离，2套光纤纵差（通道为载波距离和光纤距离），后备保护为距离保护，发变组保护为双套独立通道保护	甩负荷及对电网和其他机组影响小，出口断路器不动作，失灵保护跳出口断路器下级的开关站内的断路器	1×10^{-7}
	B项目	比较 稳定	3/2接线，有出口断路器	线路主保护为2套载波距离（通道为载波距离），后备保护为距离保护，主备保护用不同组线圈，发变组保护为双套独立通道保护	甩负荷及对电网和其他机组有一定影响，出口断路器不动作，失灵保护跳闸本开关站断路器	1×10^{-5}
	C项目	不稳定	双母接线，无出口断路器。	线路主保护为1套载波距离（通道为载波距离），后备保护为距离保护，主备保护用同组线圈，发变组保护与线路保护共用部分跳闸回路，且发变组保护Lockout继电器用扩展实现三跳	甩负荷及对电网和其他机组影响大，开关站内断路器不动作，失灵保护跳闸对侧开关站断路器	1×10^{-3}

表5 若干项目系统概率稳定比较分析表

对象		系统 安全性	开关站型式，出口断 路器，线路保护套数	关联点（从元件故障概率、主保护拒动概率、主保护动作时间和后备保护动 作时间等进行蒙特卡罗抽样，建立随机变量概率分布）	系统失稳概率 P_{los}
电网 方面	A项目	非常 稳定	3/2接线，有出口断 路器，4套	甩负荷及对电网和其他机组影响小，出口断路器不动作，失灵保护跳出口断 路器下级的开关站内的断路器	5×10^{-5}
	B项目	比较 稳定	3/2接线，有出口断 路器，2套	甩负荷及对电网和其他机组有一定影响，出口断路器不动作，失灵保护跳闸 本开关站断路器	5×10^{-4}
	C项目	不稳定	双母接线，无出口断 路器，1套	甩负荷及对电网和其他机组影响大，开关站内断路器不动作，失灵保护跳闸 对侧开关站断路器	5×10^{-3}

护配置，以及一、二次设备的配置着手，宏观分析系统可靠性（见表4），然后通过事故发生概率的量化分析（见表5）系统安全性（系统失稳概率 P_{los} ），揭示了系统风险性。

2. 电力系统中紧急控制措施的模拟和控制

在系统运行中，为了维持暂态稳定，针对状态参数，如电压、频率和功角变化，以及故障类型及严重性，常采用多种紧急控制措施，如按角度切机、连锁切机、低频减载、快速励磁系统、快关主汽门和制动电阻等^[6-7]。其中，切机分为按角度切机和连锁切机；快关汽门分为暂态快关和持续快关。

由于独立电力生产者参与国际电力市场日益加强，电力系统的控制模式由集中向分散控制转变，因此控制、维持电网安全可靠运行显得尤为重要。

结束语

主要研究印尼发电厂在无GCB下发电机出口跳闸的案例，引申到电网系统可靠性、安全稳定评估，运用无GCB系统风险分析，发电机出口、线路及系统保护跳闸形式和失灵保护分析系统风险，并引入概率工具进行分析，解决了投资海外发电厂及电网中控制可靠性、安全稳定性问题，并综合考虑成本和安全性，以确立项目经济平衡点。

需进一步研究发电机保护跳闸及其他保护影响电力系统脆弱性的因素，需考虑事故后果的严重性^[8]。境外BOT独立火电项目由于其特殊投资模式，须实践、研究出特定发电机出口跳闸方式，保证发电机保护动作稳定，保证电网可靠断开故障电源点，并不扩大化切机。在调试、运行过程

中严格把控,最终建成高性能、高收益和节能环保的优质电源项目^[8-9]。

参考文献

- [1] 余旭阳. 电力系统暂态稳定概率分析及控制的研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [2] 吴红斌. 含FACTS元件的电力系统概率暂态稳定评估[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
- [3] 程朝晖. 600 MW发电机组出口装设断路器问题的探讨[J]. 华中电力, 1999, 12(1): 18-20.
- [4] 陈为化, 江全元, 曹一家, 等. 基于风险理论的复杂电力系统脆弱性评估[J]. 电网技术, 2005,

29(4): 12-13.

- [5] 王博. 复杂电力系统安全风险及脆弱性评估方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [6] 陈伟, 夏朋辉, 何邕, 等. 印尼小电网过激磁保护设置的分析及处理[J]. 电力学报, 2014, 29(1): 14-19.
- [7] 崔芳芳, 张薇, 王晓茹, 等. 电力系统自动切负荷控制仿真研究[J]. 电气应用, 2008, 27(9): 10-12.
- [8] 陈伟. 海外工程中燃料付款与热耗率及煤耗的关联研究[J]. 华电技术, 2013, 35(9): 69-70.

(收稿日期: 2014-07-14) EA

(上接第47页)

结束语

以风电场群实际出力曲线为依据,提出基于全寿命周期理论的风电场群输出容量优化方法,构建了基于LCC的风电送出的最优容量模型。结果表明,最优输出容量的确定取决于电网的运行方式、资金的时间价值和设备报废等参数。只有确定系统容量和模型以后,才可以通过仿真确定符合线性关系的扰动容量上限。根据算例结果表明了所建模型的可行性,能体现其综合效益的最优,为风电场群的投资决策提供更加灵活有力的支持。

参考文献

- [1] 程浩忠, 张焰. 电力网络规划的方法与应用[M].

上海: 上海科学技术出版社, 2002.

- [2] Antti Saaksvuori, Anselmi Immonen. Product life cycle management[M]. Berlin: Springer, 2004.
- [3] Alain Bernard. Methods and tools for effective knowledge life-cycle management[D]. Berlin: Springer, 2008.
- [4] 王茜. 风电场与输电网协调规划的模型和方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [5] 宋宪福, 张玉丽. “浴盆”曲线理论在变电设备检修工作中的应用[C]. 山东电机工程学会第五届供电专业学术交流会论文集, 2008: 150-152.
- [6] 穆钢, 崔杨, 严干贵. 确定风电场群功率汇聚外送输电容量的静态综合优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 15-19.

(收稿日期: 2015-01-10) EA