

微型燃气轮机发电系统在城市电网黑启动中的运用

廖旭明¹, 童家鹏², 余涛²

(1. 广东电网公司东莞供电局, 广东 东莞 511700; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 分布式发电不仅能提高供电的可靠性, 同时也为用户及电网带来额外的益处。微型燃气轮机发电系统以其优越的性能被称为最佳的分布式发电, 将其引入电网的最后一道防线, 重点分析微型燃气轮机在城市电网黑启动中的运用, 研究微型燃气轮机在黑启动过程中作为备用电源的特点, 对微型燃气轮机空冲变压器所产生的励磁涌流及异步电动机负荷扰动进行仿真研究, 结果表明微型燃气轮机在城市电网黑启动中将扮演举足轻重的角色。

关键词: 微型燃气轮机; 黑启动; 励磁涌流; 负荷冲击; 仿真研究

Use of microturbine generation system for power system black-start

LIAO Xu-ming¹, TONG Jia-peng², YU Tao²

(1. Dongguan Power Supply Bureau, China Southern Power Grid Co. Ltd, Dongguan 511700, China)

(2. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Grid connected distributed generation (DG) can not only increase reliability, but also provide additional benefits for consumers as well as utilities. Microturbine (MT) generation system is regarded as the best way of distributed generation for its excellent performance. The paper introduces MT as a back-up power supply during power system black-start. It emphasizes on analyzing the characteristics of the MT as a back-up power supply and simulates the inrush current of the transformer and the load disturbance of asynchronous motor. The results indicate that MT will play an important role in black-start.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50807016) and National Natural Science Foundation of Guangdong Province(No.060300091).

Key words: microturbine; black-start; inrush current; load disturbance; simulation

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)10-0083-06

0 引言

随着电网规模的扩大, 电力系统可靠性问题更为突出, 近年来大规模停电事故频频发生。2004年IEEE PES年度学术会议上, 与会专家针对大停电的原因及防御对策进行专题讨论, 普遍的结论认为, 由于大停电发生的原因错综复杂, 即使使用现代化技术也不可能完全防止, 仅能运用一些有效的措施来缩小事故范围和加快恢复时间^[1]。几乎所有关于大停电事故的文献都强调作为电网最后一道防线的恢复控制的重要性^[1-3], 因此, 在重大事故导致系统发生大停电之前制定黑启动(Black-start)方案显得极其重要。

由于珠江三角洲这类负荷密度大的城市电网缺

乏水电机组, 均以燃油电厂和燃气电厂作为地方发电的主力电厂, 当电网发生大规模停电时, 燃油电厂是这里唯一可靠的黑启动电源^[4]。根据国家发改委规定及广东电网“十一五规划”^[5]: 效率低、环境污染大的小火电机组将在未来五年中逐步退出运行, 将重点发展高效、大容量的核电、超临界燃煤机组和燃气-蒸气联合循环机组。但这些新建机组由于单机容量庞大(300 MW以上), 一般电厂所配应急柴油发电机由于缺乏足够的功率, 仅能提供电厂内的事事故照明用电, 启动时需依赖外部电网, 无法实现机组的黑启动。上述的城市大电网将面临黑启动电源缺失的尴尬境地。

仔细分析“8.14美加大停电”可以发现, 美国最大的储备和输送天然气的公司 Dominion Transmission 却独善其身, 在大停电后该公司旗下的几条输送管道能够持续运行一天以上, 因为这几条输电管道均采用微型燃气轮机作为备用电源^[6]。

微型燃气轮机 (Microturbine) 是一种新型的热能动力系统, 它具有寿命长、可靠性高、燃料适应性好、环境污染小和便于灵活控制等优点^[7], 因此被称为最佳的分布式发电方式, 典型的微型燃气轮机发电系统如图 1。上述 Dominion Transmission 的例子是微型燃气轮机作为备用电源的一个典范, 减少停电带来损失。本文将 MT 引入电网恢复控制, 将其作为黑启动过程中的备用电源, 分析 MT 的结构、容量及对黑启动方案的改进, 重点研究 MT 空冲变压器所产生的励磁涌流 (Inrush Current) 和异步电动机负荷冲击。仿真结果表明, 电压型逆变器 VSI (Voltage Source Inverter) 接口的 MT 系统能够将励磁涌流限制在较低的水平, 并能够很好地控制负荷波动对 MT 影响, MT 能够在黑启动这一特殊的过程中扮演重要角色。

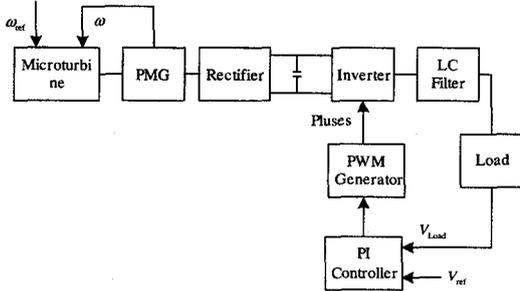


图 1 微型燃气轮机发电系统示意图

Fig. 1 Microturbine generation system architecture

而产生的瞬时偏差; 加速度控制则在 MT 起机的時候限制转子的加速度, 改善起机时的热应力, 确保 MT 安全快速启动, 有利于加快黑启动进程。图 2 的排气温度方程 f_1 和转矩方程 f_2 可表示为:

$$f_1 = T_R - 700(1 - W_f) + 550(1 - \omega) \quad (1)$$

$$f_2 = 1.3(W_f - 0.23) + 0.5(1 - \omega) \quad (2)$$

其中: ω 为燃机转速, W_f 为燃料流量信号, T_R 为排气温度基准, 本论文中取 $T_R=950^\circ\text{C}$, ω 为发电机转速。转矩方程在 100% 负荷的情况下基本上是精确的, 在其他情况下会存在小于 5% 的误差, 排气温度方程相对来说不是那么精确, 但由于温度控制只在温度参考值附近起作用, 因此可以忽略其带来的影响^[9]。MT 发电系统电气部分的模型详见文献^[10], 文献^[11]对 MT 采用自抗扰控制, 结果表明该控制器能够很好地提高 MT 的稳定性及鲁棒性。

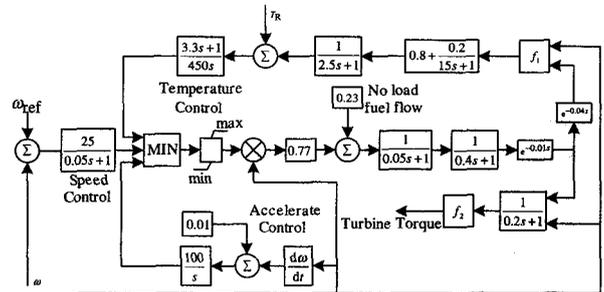


图 2 微型燃气轮机模型

Fig. 2 Microturbine model

1 MT 结构、模型及控制

MT 有两种设计: 一种是将压缩机和汽轮机安装在同一轴上, 得到一种高速的 MT; 另一种是裂轴型设计, 通过一个变速箱将 3 000 rpm 的汽轮机与常规的发电机相连^[8], 本文的研究对象是前者。MT 做功直接驱动高速永磁同步发电机 (转速在 50 000~120 000 r/min 之间) 发电, 高频交流电流经过整流器和逆变器, 即“AC-DC-AC”变换转化为工频交流电输送到交流电网。假定微型燃气轮机工作在额定转速附近, 且不考虑开机与停机的慢动态过程^[9], 在此基础上建立的微型燃气轮机模型如图 2。

微型燃气轮机的控制包括转速控制 (Speed control) 及加速度控制 (Accelerate control)、温度控制 (Temperature control) 和燃料控制 (Fuel flow control)。转速控制在负荷变化时起主要作用, 能够适应黑启动过程快速变化的负荷; 温度控制则起到限制 MT 排气温度的作用, 使其不受外界环境温度和燃料特性的影响, 同时补偿由测量系统时间常数

2 MT 的黑启动能力

2.1 MT 备用能力

MT 结构比较简单, 将燃气轮机和发电机设计成一体, 转子和发电机同轴, 因此整个系统只有一个转动部件, 几乎不需要维护, 通常能够连续运行 8 000 h 以上。快速自启动和极高的运行可靠性都是传统电源无法比拟的。

MT 系统的逆变器采用 VSI (电压型逆变器), 能够实现无源逆变, 这使得它不仅可以并网运行, 而且可以孤立运行, 两种状态之间转换只需要不到 10 s 的时间。这使得它在正常情况下作为分布式发电向系统中送电, 而在紧急事故下可以通过系统的控制实现孤立运行, 不仅为电厂提供保安用电, 实现电厂的黑启动, 也能够为医院和国防等关键的部门提供紧急用电; 而传统的备用电源如柴油发电机在正常情况下仅作为闲置的资产。30 kW 的 MT 通常重量仅为几百千克, 尺寸也仅比家用冰箱略大一些, 同时它既能以液态的煤油和柴油发电, 也能使

用丙烷和天然气发电^[12], 这使得它能够在诸如大冰灾和地震这类紧急的情况下, 方便地解决燃料供给问题。

微型燃气轮机的容量一般在 25~500 kW 之间, 600~1 000 kW 更大容量的 MT 已经进入生产和生活中。MT 在 CERTS 组织对微网 (Microgrid) 的研究中发挥了重要的作用, 该研究机构对两台微型燃气轮机并联的性能进行试验^[13], 一个天然气罐储存的燃料能够提供两台 MT 满负荷运行长达 7 h 以上, 而这些罐装天然气很容易从当地供应商中获得。显然单台 MT 无法提供足够的备用能力, 但 Capstone 公司生产的 PowerServer CPS100 服务器能够将多达 100 台微型燃气轮机整合为一体综合控制, 这不仅提高了发电效率, 同时也得到了一个几百 kW 至几 MW 的微型燃气轮机群^[12]。因此微型燃气轮机不仅能为几百 kW 的小型燃油机组提供黑启动服务, 也能协助启动更大容量的燃煤机组。东莞电网某电厂有 8 台容量为 6 MW 至 30 MW 的燃煤发电机组, 通过一台 1 350 kW 的柴油发电机即能实现自启动^[14], 因此上述的微型燃气轮机群完全能够满足黑启动的容量要求。

由于水电机组的主要动力设备结构简单, 启动过程简单迅速, 辅机容量要求小, 易于实现自动化, 因此水电机组是黑启动电源的首选; 小型的燃油机组 (每台发电机容量为 10~20 MW 左右), 辅机启动容量比较小 (几百到一千千瓦), 控制系统相对简单, 启动时间较短 (约为 30 min 以内), 因此, 在这些电厂可以配备 1~2 台柴油机, 启动发电机组的辅机, 进而启动一台发电机, 这在很多没有水电的地方电网都是可行的。但水电机组由于调速系统较慢的反应速率限制了其调节性能, 并且水电厂通常在距离城市电网较远的边远地区; 同时小容量燃油电厂由于效率低、环境污染大而逐步退出运行。也有文献将重型燃气轮机作为黑启动电源^[15], 但其启动功率和启动需要的辅助蒸汽量均过大。

所有这些机组包括超临界燃煤机组和燃气-蒸汽联合循环机组均需要辅机提供启动功率才能实现自启动, 提供如此之大的备用容量是不经济的, 尤其是备用柴油机。考虑到黑启动设备在电网正常运行时通常是不经济的, 电网公司通常与相关电厂签订与黑启动相应的商业协议。MT 能够很好地改善这种状况, 它既能作为分布式发电在正常情况下并网或孤立运行, 也能在黑启动这类紧急状况下提供备用。并且单台 MT 的效率通常在 25%~35% 之间, 冷热电联合循环的 MT 通常能获得 80% 以上的效率, 且氮氧化物排放量能够控制在较低的水平。

2.2 黑启动策略

黑启动策略的选择受网内主要发电机组电源和黑启动电源分布影响很大^[16]。黑启动分区展开在电网恢复速度上有明显的优势, 电网发生大面积停电后, 应当先将电网分割为多个子系统, 同时启动各子系统中具有黑启动能力的机组, 建立稳定的各个子系统, 并实现同步并列, 这是恢复电网运行的最有效的方法, 因此在黑启动方案中应考虑多个黑启动电源^[3]。

正如背景中所述, 由于某些原本具备自启动能力的电厂将备用柴油机卖出而失去自启动能力, 导致黑启动电源不足, 第一个策略将不适合负荷密度大的城市电网黑启动, 这很大程度上增加了系统恢复供电的时间, 使用户因停电而导致的损失增加。在某些情况下黑启动路径较长, 沿途没有发电机支撑, 长距离送电末端电压难以得到有力支撑; 更为严重的是某些线路由于改造各种原因被移除, 切断了区域之间原有的联系, 第二个策略根本无法实现。利用 MT 作为某些电厂新型的备用电源, 这不仅改善了备用柴油机不经济的缺点, 同时也使电厂具备自启动能力, 这样获得更多的黑启动电源, 两种策略均容易实现。

2.3 MT 运用在黑启动中的关键问题

在黑启动过程中所面对的主要问题是空冲主变时产生的励磁涌流、发电机带长线而引发的自励磁、空载线路合闸导致的系统内部过电压。励磁涌流一般经历几个周波就几乎完全衰减; 一旦自励磁产生的条件得到满足时, 发电机端电压也在很短的时间内增大到较高的一个数值; 系统过电压是从一种状态经过振荡转变为另一种稳定工作状态过程中所产生的暂态性质的过电压。由于 MT 在黑启动中所扮演的角色不是大型黑启动电源, 不需要进行空冲主变操作, 也不需要进行合闸空载线路, 更不会出现 MT 带长线运行的情况。但 MT 输出的电压较低, 为了给某些电压较高的产用设备供电, 需要进行空冲变压器操作, 必须确保所产生励磁涌流不会对 MT 产生很大的冲击; 另外, 在黑启动初期需要启动某些电厂内的单机容量较大的异步电动机, MT 必须耐受异步电动机启动时冲击电流的影响。

在黑启动过程中, 必须严格根据黑启动方案中所制定的规则及步骤来进行, 文献[17]给出了黑启动过程的基本框架, 文献[18]描述了黑启动发电机组的配置方法, 采用分级黑启动的方法, 用一台 250 kW 的备用柴油机启动一台 38 MW 的汽轮机, 继而启动两台容量分别为 130 MW 和 300 MW 的大型机组。用分布式发电的 MT 备用来代替上述的柴

油机，作为电厂黑启动所需要的备用辅机，相应的操作步骤可以由如下三个阶段组成：建立低压电网、形成孤岛和孤岛同步，本文主要研究第一阶段。

考虑到最严重的情况，地区电网所有电力供应均被切除，MT 也处于停机阶段。首先，由 MT 内部的永磁同步发电机在起机时作为启动电机来启动 MT，启动所需要的功率由 MT 配备的电池供应，从面板初始化到满负荷，快的机型 2 min 即能完成，Capstone MT 启动后从空载到满负荷可能的最短时间只需要 10 s，现有的 MT 机型并网运行时大约仅需 30 s，而孤立运行时还能快 10 s 左右^[19]。在负荷波动时，MT 配备的电池能够提供相应的功率来抑制负荷波动的影响，从而获得更为优越的动态调节性能。然后，用 MT 去启动几 MW 至几十 MW 的小型机组。最后，启动后的小型机组可以用来启动整个电厂，也可以给附近的其他大型电厂送电，进而实现电厂的逐步启动。在这个阶段，必须关注励磁涌流、自励磁和过电压这三个关键的问题。随着电厂的逐步启动，形成了若干个孤岛系统，如果在各个孤岛内又有较多的 MT 运行，则对孤岛系统的频率也有一定程度的支撑作用。当孤岛与孤岛之间同步的条件满足时则进行孤岛同步，进而与上一级系统实现同步。

3 案例分析及仿真研究

3.1 案例分析

在黑启动初期，由于过电压和自励磁，使得通过长线路对远方变电站充电难以实现。以东莞为例，随着小型燃油电厂的退出运行，缺乏足够的黑启动电源，只有万江片的东糖甲电厂具备自启动能力，启动时间需要 2 h 以上；且东部和西部之间只能通过 110 kV 的寒排线联系，在西北的万江-板桥片黑启动形成初始电网后，难以通过长距离的快速通道启动东部地区容量较大的通明电厂和樟洋电厂；同时随着电网改造的进行，某些路径被切断，使得部分地区无法通过 110 kV 线路实现黑启动，要等上级电网黑启动后为这些地区提供黑启动电源，这增加了电网恢复的时间^[14]。为了在最短的时间内实现电网恢复，需要更多的黑启动电源，可以用 MT 作为备用电源来改造东莞中部和东部的某些电厂，使其具备黑启动能力，这就能够将系统分割成若干个子系统，使这些子系统同时进行黑启动，缩短恢复持续的时间^[20]。

2005 年海南发生的大停电是由台风引起的，给生产和生活带来极大的损失，因此，做好在极端天气情况下导致的大停电恢复工作极为重要。作为主

力电厂的海口电厂没有配备事故备用电源，事故后该电厂岌岌可危。海南电网公司在明知电压偏高的情况下临时改变路径向海口电厂送电^[3]。这有可能导致故障的出现，使黑启动无法顺利进行，但如果海口电厂有 MT 作为备用电源则有利于黑启动的顺利进行。

针对上述两个案例，可以找到两种解决方案。首先，发电厂自身可以引入 MT，作为紧急情况的备用电源，也可以在系统正常运行时为电厂的关键负荷供电。其次，如果 MT 是作为 DG 分布在负荷附近，则作为城市电网，负荷也靠近发电厂，可以利用 10 kV 线路将 MT 所发电力输送至电厂 10 kV 母线，如图 3 所示。这些 MT 有可能作为某些企业的自备机组，电网公司可以与他们签订相关的黑启动辅助服务协议。

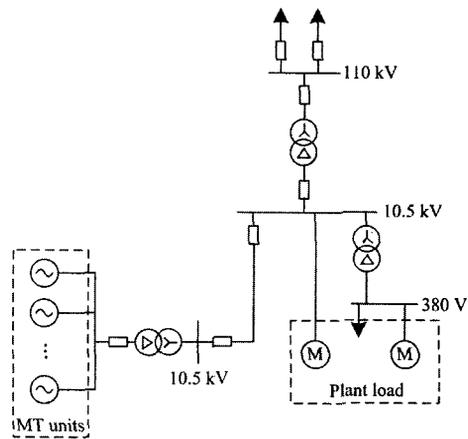


图 3 利用 MT 启动电厂示意图

Fig. 3 Using MT units to start a plan

3.2 励磁涌流仿真

由于励磁涌流持续的时间很短，其对变压器等设备无致命性的破坏，但在黑启动这类特殊的过程中，必须确保整个过程的顺利进行。此部分对微型燃气轮机空冲变压器所产生的励磁涌流进行仿真研究。

此部分仿真模拟一台容量为 30 kW 的微型燃气轮机对一台额定容量为 50 kW 的变压器进行空冲试验，首先微型燃气轮机带 10 kW 的负荷进入稳态，在第 10 s 断路器合闸，仿真结果如图 4。

对于不超过 MT 发电容量 2 倍的变压器进行充电，励磁涌流不会导致逆变器连续换相失败，整流/逆变器构成的直流输电系统可以很好隔绝励磁涌流对发电机转速和微型燃气轮机动力系统的冲击，在考虑剩磁影响比较严重的情况下，即 $\Phi_{ra}=0.8$ p. u.、 $\Phi_{rb}=-0.8$ p. u. 和 $\Phi_{rc}=0.8$ p. u.^[4]，励磁涌流一般经

过 15 个周波即完全衰减。影响励磁涌流大小的一个主要因素是送端电压^[4], VSI 能够采用较高的频率, 在一定程度上稳定了逆变器出口电压, 同时减少波动对发电机转速及 MT 动力系统的冲击。多个 MT 不仅在一定程度上稳定电压, 同时增大了转子系统的转动惯量, 使系统耐受电磁功率暂态变化的能力更强, 因此 MT 群比单台 MT 要具备更强抵御励磁涌流冲击的能力。

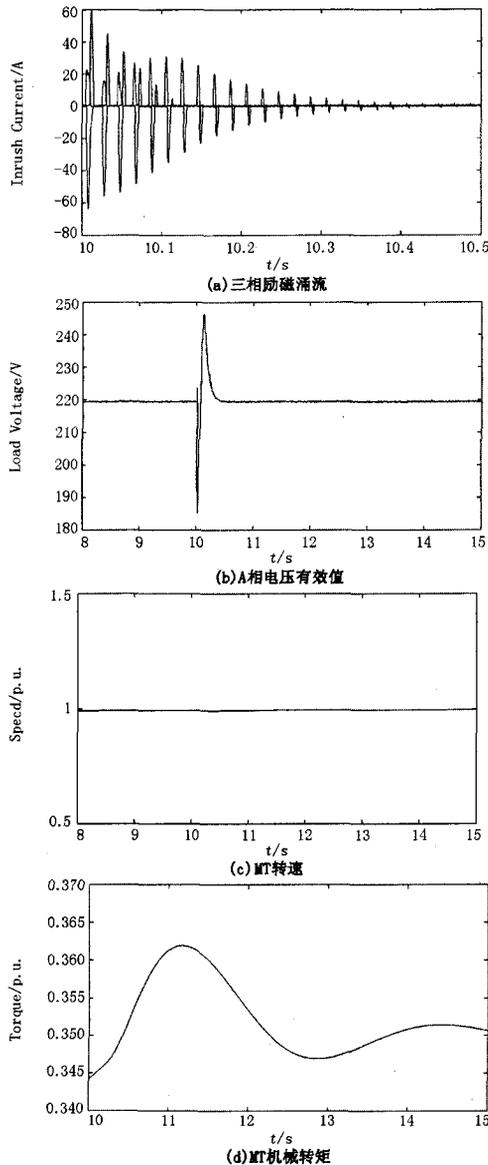


图 4 MT 空冲变压器输出波形
Fig. 4 Inrush current simulation

但研究也发现, 一般较大容量的 MT 为几百 kW, 即使多台 MT 构成 MT 群, 也仅能空冲十几 MW 级的主变。因此, MT 群具备空冲一般火电厂

10 kV/380 V 厂用变压器的能力, 但不具备空冲 10 kV/110 kV 及以上电压等级变电站主变的能力。因此若在电网规划建设中, 将 MT 群安装在地方大型火电厂附近, 且可通过 10 kV 线路进行互联, 则应可克服励磁涌流冲击这一技术障碍。

3.3 黑启动负荷冲击仿真研究

MT 群要成功启动不具备自启动能力的大型机组, 则必须首先去启动这些电厂的重要负荷, 这些负荷通常会伴随较大启动电流的电动机。这种动态负荷冲击是 MT 群能否成功对电网进行黑启动的关键之一。

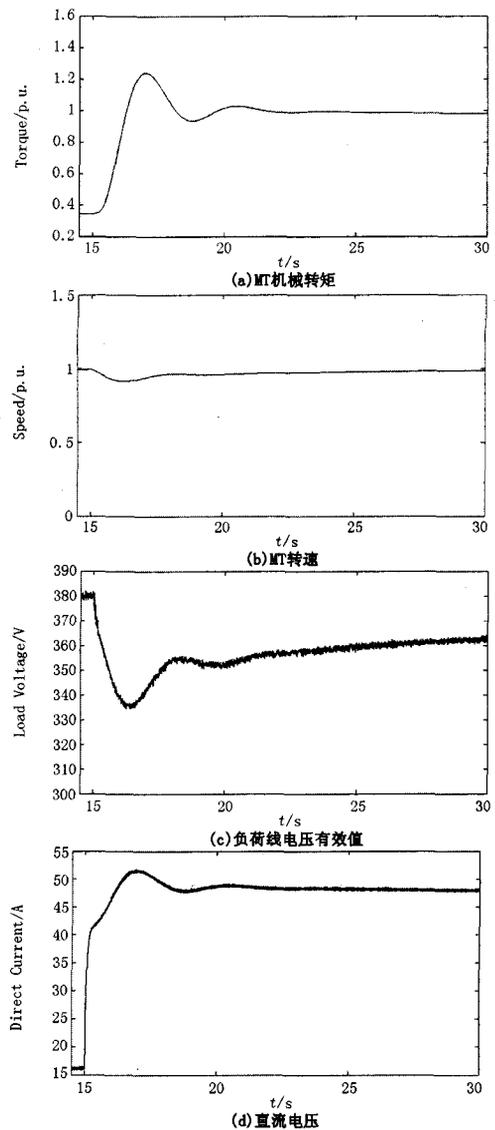


图 5 异步电动机负荷冲击实验
Fig. 5 Load disturbance of asynchronous motor

下面对单台 30 kW 的微型燃气轮机能否承受较

大容量的电动机负荷冲击进行仿真, 首先微型燃气轮机带 10 kW 静态负荷进入稳态, 在第 15 s 接入 15 kW 的异步电动机负荷, 仿真结果如图 5。

通过我们研究发现, 基于 VSI 的换流器能很好地耐受异步电动机冲击, 负荷暂态冲击电流使 MT 转速发生较大波动, 但不会导致 MT 转速失稳, 这首先得益于 MT 快速响应特性, 并且实际的 MT 自身配备的电池能够提供负荷波动时必要的能量, 这进一步减缓了负荷波动的影响。由于异步电动机的投入, 使得负荷电压下降较为明显, 但也维持在允许范围内。

4 结论

本文通过对微型燃气轮机的结构和性能进行分析, 并进行相应的仿真实验, 得出如下结论:

a) 单台微型燃气轮机的容量较小, 但可以通过适当的组合配备, 同时加以有效的控制, 能够满足黑启动的保安用电要求, 也能够提供安全可靠的厂用电。

b) 采用 VSI 能够实现无源逆变, 能够同时且独立地控制有功功率和无功功率, 调节性能优越, 能够应对黑启动过程中的各种扰动, 特别是能够耐受异步电动机的冲击, 确保黑启动过程的顺利进行。

c) 微型燃气轮机在空冲变压器时能够很好地抑制变压器的励磁涌流, 有效地控制交流侧的电压, 整流/逆变器构成的直流输电系统可以很好地隔绝励磁涌流对发电机转速和微型燃气轮机动力系统的冲击。

d) 可以利用微型燃气轮机将无自启动能力的电厂改造为具备自启动能力, 不仅为黑启动提供更多的黑启动电源, 允许将黑启动电网划分为若干子系统, 加快黑启动进程。

参考文献

- [1] 傅书遍. IEEE PES 2004 会议电网安全问题综述及防止大面积停电事故建议[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 1-3.
FU Shu-ti. Summary on Power System Security Problems on 2004 IEEE PES Meeting and Recommendation for Developing Defense Measures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 1-3.
- [2] 陈向宜, 陈允平, 李春艳, 等. 构建大电网安全防御体系[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 4-8.
CHEN Xiang-yi, CHEN Yun-ping, LI Chun-yan, et al. Constructing Wide Area Security Defensive System in Bulk Power Grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 4-8.
- [3] 唐斯庆, 张弥, 李建设, 等. 海南电网“9.26”大面积停电事故的分析与总结[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 1-7, 16.
TANG Si-qing, ZHANG Mi, LI Jian-she, et al. Review of Blackout in Hainan on September 26th—Causes and Recommendations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 1-7, 16.
- [4] 余涛, 韦曼芳, 陈家荣. 燃油电厂黑启动初期励磁涌流的数字仿真和试验研究[J]. 继电器, 2006, 34(10): 32-36.
YU Tao, WEI Man-fang, CHANG Ka-wing. Simulation and Experimental Study on Transformer Excitation Inrush Current in Black-start of Oil-fired Thermal Plants[J]. Relay, 2006, 34(10): 32-36.
- [5] 广东电网公司. 《广东电网“十一五”规划——第三册: 电源规划》[Z]. 内部资料, 广州: 2005.
Guangdong Power Grid Company. Guangdong Power Grid Eleventh Five-year Plan: Power Source Plan[Z]. Guangzhou: 2005.
- [6] Engle D. The Benefits of Onsite Power[EB/OL]. Distributed Energy, <http://www.DistributedNRG.com>
- [7] 杨策, 刘宏伟, 李晓. 微型燃气轮机技术[J]. 热能动力工程, 2003, 18(1): 1-4.
YANG Ce, LIU Hong-wei, LI Xiao. Micro-Turbine Technology [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2003, 18(1): 1-4.
- [8] Zhu Y, Tomsovic K. Development of Models for Analyzing the Load-following Performance of Microturbines and Fuel Cells [J]. Electric Power System Research, 2002, 62(1): 1-11.
- [9] Rowen W I. Simplified Mathematical Representations of Heavy Duty Gas Turbines[J]. Journal of Engineering for Power, 1983, 105(4): 865-869.
- [10] 余涛, 童家鹏. 微型燃气轮机发电系统的建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 27-31, 45.
YU Tao, TONG Jia-peng. Modeling and Simulation of the Microturbine Generation System[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 27-31, 45.
- [11] 余涛, 童家鹏. 微型燃气轮机发电系统的自抗扰控制仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 已录用.
YU Tao, TONG Jia-peng. Auto Disturbance Rejection Control of Micro Gas Turbine System[J]. Power System Protection and Control, to be Published.
- [12] www.capstonemicroturbine.com.
- [13] Robert J. Yinger. Behavior of Two Capstone 30kW Microturbines Operating in Parallel with Impedance Between Them[EB/OL]. California Energy Commission, <http://certs.lbl.gov/pdf/55907.pdf>
- [14] 广电集团东莞供电分公司. 东莞电网黑启动方案修编[T]. 2008.

3 结束语

本文分别以交-交变频器或交-直-交 PWM 变频器作交流励磁发电机的励磁电源进行仿真分析,前者输出电压中含有大量的谐波,输入侧功率因数也很低,对电网和发电机均有严重的谐波污染和负面效应;后者虽然改善了输出性能,但不控整流加电容滤波的变换造成输入电流畸变、谐波增大,输入功率因数低下,且需要大体积的直流储能电容,更为不利的是难以实现同步速上、下运行时交流励磁电源必需的功率双向流动。因此交流励磁发电技术实现的关键在于寻求一种输入、输出特性好,无电力谐波,功率可双向流的“绿色”变频器。矩阵式交-交变频器正是能满足这些要求的功率变换器。本文在 Saber 仿真平台下对矩阵式变频器与交-交变频器或交-直-交 PWM 变频器进行性能对比分析,结果表明矩阵式变频器不但具有再生运行能力,解决了交流励磁发电机转子回路能量的回馈问题,而且其输入功率因数高,输入电流波形正弦性比交-直-交、交-交变频器好,对电网的谐波污染较小,因此它将可能成为交流励磁发电机理想的励磁电源。

参考文献

[1] 徐锦才,等. 多相励磁发电技术的研究概述[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(4): 44-46.
 [2] 邵为民. 新型的转差频率励磁发电机[J]. 电工技术学报, 1989(2): 35-39.
 [3] 肖刚,等. 矩阵式变换器励磁的双馈发电机系统建模与仿真[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2003, (3): 89-94.
 [4] Holmes P G, et al. Cycloconverter Excited Divided-winding Doubly-fed Machine As a Wind-power Converter[J]. IEE Proceedings, 1984, 131(2): 61-69.
 [5] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly Fed Induction Generator Using Back-to-back PWM Converters and Its Application to Variable-speed Wind-energy Generation[J]. Electric Power Applications, IEE Proceedings, 1996, 143(3): 231-241.
 [6] 王兆安,黄俊. 电力电子技术(第4版)[M]. 北京: 机械工业出版社,2000.

收稿日期: 2009-02-19; 修回日期: 2009-04-05

作者简介:

赵淑娟(1973-),女,工学学士,讲师,工程师,现主要从事电机及电气控制方面的教学及科研工作。E-mail: 492380211@qq.com

(上接第 88 页 continued from page 88)

Dongguan Electricity Supply Branch Company Black-start Project revision of Dongguan Power Grid [T]. 2008.
 [15] 俞立凡,李彩玲,彭竹君. 9F 单轴燃机作为电网黑启动电源点的探讨[J]. 浙江电力, 2006, (6): 53-56.
 YU Li-fan, LI Cai-lin, PENG Zhu-jun. Discussion of 9F Single Shaft Gas Turbine As Power of Black-start[J]. Zhejiang Electric Power, 2006, (6): 53-56.
 [16] Barsali S, Poli D, Pratico A, et al. Restoration Islands Supplied by Gas Turbines [J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(12): 2004-2010.
 [17] Ancona J J. A Framework for Power System Restoration Following a Major Power Failure [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 1480-1458.
 [18] 李苏宁. 黑启动试验时发电机组运行方式的配置[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(18): 104-107.
 LI Su-ning. Operation Mode Arrangement of Generator During Black-start Experiment[J]. Automation of Electric

Power Systems, 2007, 31(18): 104-107.

[19] Yinger R J. Behavior of Capstone and Honeywell Micro-turbine Generators During Load Changes[EB/OL]. California Energy Commission, <http://certs.lbl.gov/pdf/49095.pdf>
 [20] Adibi M M, Fink L H. Power System Restoration Planning [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 22-28.

收稿日期: 2009-02-25; 修回日期: 2008-03-18

作者简介:

廖旭明(1972-),男,本科,研究方向为地区电网的黑启动方法; E-mail: 2452743@163.com

童家鹏(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统自动控制;

余涛(1974-),男,副教授,博士,长期从事电力系统稳定性、非线性鲁棒协调控制等方面的研究工作。