

火电机组快速甩负荷功能的应用和实现

门 冉¹, 高小涛², 盛昌栋¹

(1.东南大学能源与环境学院,江苏南京 210096;2.江苏省电力科学研究院,江苏南京 211103)

摘 要:火电机组快速甩负荷(FCB)功能的实现对于电网大面积停电后的快速恢复,减少停电带来的损失有重要作用。在综述电网黑启动重要性及国内外机组FCB发展的基础上,重点针对国内电网火电机组实现FCB的必要性和可能性,从系统配置、运行控制和操纵人员技能三方面分析了火电机组参与FCB的影响因素以及相应的解决方法或原则,为我国火电机组增强或完善FCB功能提供参考。

关键词:火电机组;黑启动;FCB

中图分类号:TM714

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2015)01-0009-04

近年来发生的多起大停电事故表明,无论发展中国家还是发达国家,都存在发生大面积停电的可能性。为了能够在事故后快速恢复供电,减少损失,电网必须制定黑启动预案。黑启动电源对于黑启动和电网恢复至关重要,因而需要合理选择黑启动电源;在实际电网黑启动系统重构阶段,机组快速并网供电,对于缩短电网恢复时间和减少损失起重要作用^[1]。因此,在黑启动预案中需要考虑和利用电网内机组的能力。

火电机组快速甩负荷(FCB)功能是指当机组发生某些严重故障时,可以快速地甩负荷到带本机组厂用电运行,且在甩负荷过程中运行参数变化在安全范围内,不损坏设备,而当故障排除后可快速并网和升负荷。因此,具备FCB功能火电机组可作为黑启动电源,或在电网停电时保持带厂用电运行、电网恢复过程中快速并网供电,在电网黑启动和恢复过程中发挥重要作用^[2]。在我国,火电机组是各大电网主要供电机组,在制定电网黑启动预案时应充分考虑火电机组可能发挥的作用。针对火电机组FCB功能在电网黑启动过程中的应用和实现,主要就国内外火电机组FCB功能的应用现状、国内试验研究现状和影响火电机组FCB功能实现的主要因素进行了综述和分析。

1 国内外火电机组FCB功能的应用现状

欧美等发达国家经历过多次大面积停电事故,对电网黑启动过程的研究和火电机组的应用极为重视,机组向电网提供黑启动服务的体系成熟,对电网内机组FCB功能的要求也很明确。如瑞典国家电网规定,50 MW以上的机组都必须能够实现FCB功能,并具备12 h的带厂用电运行能力^[3];意大利电网公司要求单机容量大于320 MW的火电机组应具备实现甩负荷带厂用电运行的能力^[4,5];日本1981年之后投产的火电机组都要求具有FCB功能^[6]。另外,欧洲和日本出口的一些火电机组也具有实现FCB功能的能力^[2,7]。

收稿日期:2014-08-15;修回日期:2014-10-09

一些电网容量小且易发生大面积停电事故的发展中国家,对火电机组FCB功能的应用同样十分重视,也有明确要求。如马来西亚国家电网规程要求,机组在完全脱离电网的条件下应具备2 h带厂用电运行的能力,且保证在带厂用电运行期间可随时并网,并按正常运行方式向电网供电^[8];印度中央电力管理局2010年发布的发电厂和输电线路建设导则中,要求电网内机组必须具有甩负荷带厂用电的能力^[9]。另外,进口我国火电机组的一些国家如印度、印尼、越南、伊朗和巴基斯坦等,也都要求机组具有实现FCB功能的能力,在机组合同交付时必须进行FCB功能验收。

为提高电网供电安全性,我国电监会在2006年发布了《并网发电厂辅助服务管理暂行办法》,将黑启动服务作为保障电力系统安全运行和保证供电质量的重要辅助服务,可提供黑启动服务的机组就包括火电机组。尽管如此,目前各区域电网调度部门下发的并网发电厂辅助服务管理办法中,对火电机组提供黑启动服务的补偿和考核标准不尽合理;大多数区域电网对火电机组在黑启动中的作用不够重视,缺少将FCB火电机组作为黑启动电源以及充分利用机组FCB功能的黑启动预案。另一方面,我国还没有关于火电机组FCB功能的强制性技术标准,机组实现FCB功能的能力参差不齐。部分进口机组设计有FCB功能,在机组合同交付时进行了FCB验收,在实际运行中有良好的表现^[2,7];部分机组在设计时考虑到机组的FCB功能,有实现FCB功能的潜力;大多数机组设计时未考虑实现FCB功能的需要。这就导致在政策和规范层面上对火电机组在电网黑启动的应用推动不足,发电企业对建设机组FCB能力的积极性不高,也不够重视。因此,亟需建立相应的市场服务和机组技术规范,推动火电机组FCB功能的建设和应用。

2 国内火电机组FCB功能的研究现状

近年来国内外发生多起大停电事故,引起我国对

电网供电安全性的高度重视,相应地火电机组 FCB 功能在电网黑启动中的应用也得到关注,并开展试验研究。我国从 1982 年起就有相关机组的 FCB 试验研究,例如宝钢电厂 350 MW 亚临界机组 FCB 试验^[11],研究对象涵盖大部分典型机组,包括超高压机组、亚临界机组、超临界机组和超超临界机组等^[2,10-14]。

这些试验为火电机组 FCB 功能运行和在黑启动过程中的可能应用积累了经验。但是,从黑启动应用需要来看,已有的试验研究还存在不足之处:大部分机组的 FCB 试验持续时间在 5~20 min,对机组长时间带厂用电运行的研究不足;试验研究多停留在机组故障时实现“停机不停炉”以及输电线路故障时带厂用电运行的水平上;大多数局限于机组试验,而对机组作为电网黑启动电源以及针对性地利用机组 FCB 功能的黑启动预案的试验研究极少,已知只有将具有 FCB 功能的外高桥三厂 1000 MW 超超临界机组作为黑启动电源,对上海 500 kV 线路送电黑启动试验^[15]。因此,为进一步提高电网供电和机组运行安全性,仍需要进一步加强对机组 FCB 功能应用的研究,特别是机组作为黑启动电源和在电网恢复过程中作用的研究。

3 影响火电机组实现 FCB 功能的因素

火电机组 FCB 功能的实现是一个复杂过程,对机组系统配置、设备性能和控制以及运行水平等均有较高要求,因此有许多因素影响机组 FCB 功能的实现。

3.1 主机连锁配置

单向主机连锁配置是机组实现 FCB 功能的前提。完整的单向主机连锁是:主变压器出口开关跳闸时,连锁汽轮发电机组快速甩负荷,实现带厂用电运行,锅炉通过旁路系统维持运行,不停机也不停炉;发电机出口开关跳闸时,连锁汽轮发电机组甩负荷到 0,转速控制在 3000 r/min,锅炉通过旁路系统维持运行,实现汽轮机、锅炉不停,发电机灭磁;汽轮机跳闸时,连锁发电机和主变压器出线开关跳闸,锅炉通过旁路系统维持运行,实现停机不停炉;锅炉跳闸时,连锁汽轮发电机组及主变压器出线开关跳闸,主机全停。

我国现役火电机组中,部分引进欧洲技术建成的机组采用单向连锁控制方式,有利于机组实现 FCB 功能;而大多数机组采用横向大连锁,即锅炉、汽轮机和发电机任一主机发出跳闸信号就会连锁主机全停,这显然不利于 FCB 功能的实现^[2,14]。因此,为实现 FCB 功能,在设备允许的条件下,设计时应优先考虑采用单向主机连锁方式,已投产机组也可以对主机连锁进行改造。

3.2 机组旁路配置

旁路在机组实现 FCB 过程中起旁通蒸汽、缓解锅

炉压力飞升和维持机组工质循环的作用,旁路系统配置对机组 FCB 功能的实现有重要影响。

我国火电机组采用的旁路配置形式主要有:容量为 100% 锅炉最大连续蒸发量(BMCR)的高压旁路加 65%~80% BMCR 的低压旁路的大旁路系统;容量为 25%~50% BMCR 的高、低压小旁路系统。现役机组中,少部分采用大旁路系统,大部分采用小旁路系统。采用 2 种旁路系统配置的机组均有实现 FCB 功能的实例,但实现 FCB 功能的特点和能力不同^[2,7]。

大旁路系统机组实现 FCB 功能的特点是:机组 FCB 动作后,旁路快速开启,锅炉压力飞升能够得到有效控制,超压可能性低;在 FCB 实现过程中能够回收大部分工质,汽水循环中断和再热器金属管壁超温可能性小;在旁路配合下,燃烧较易控制,燃烧恶化触发锅炉主燃料跳闸(MFT)可能性低;机组带厂用电运行时,可以根据实际情况保持较高的燃烧负荷,运行可靠性高。相关机组的 FCB 试验表明,这种配置相对较易于实现 FCB 功能^[2]。

小旁路系统机组实现 FCB 功能的特点是:高负荷条件下 FCB 动作后,旁路可能不足以缓解锅炉压力飞升,超压可能性大;大量蒸汽需要通过 PCV 阀或再热器安全门排出,循环工质流量下降快,存在再热器金属超温和触发锅炉 MFT 的可能;FCB 动作后需要快速降低锅炉燃烧负荷,燃烧控制难度大;带厂用电运行时,燃烧负荷接近锅炉最低稳燃负荷,运行可靠性低。虽然机组采用小容量旁路系统的投资较少,但实现 FCB 功能的难度较大^[7]。从 FCB 功能的实现及应用出发,在机组设计时应考虑采用大容量旁路系统,而采用小旁路系统的机组则需要加强 FCB 功能的建设。

3.3 给水系统配置

给水系统配置对机组 FCB 功能实现有决定性作用。国内现役火电机组给水系统的典型配置是:设置 2 台 50% 容量的汽动给水泵和 1 台 25%~50% 容量的电动给水泵。机组 FCB 实现过程中,根据给水系统配置,给水流量的控制方式有:只通过汽动给水泵调整给水流量;电动给水泵配合汽动给水泵来调整给水流量。国内多数机组汽动给水泵的动力汽源有二:即取自机组冷段再热蒸汽的高压汽源和取自汽轮机抽汽或辅助蒸汽系统的低压汽源。机组正常运行时,汽动给水泵的动力汽源取自汽轮机抽汽,而 FCB 动作后汽源要迅速切换为高压蒸汽或者辅助蒸汽。为确保机组 FCB 功能的实现,FCB 动作后给水系统配置应能够实现给水泵汽源的快速切换,并满足汽源切换过程中给水流量变化不触发锅炉 MFT 动作;采用电动给水泵参与给水流量调节时,FCB 动作后的厂用电系统应能够承受启动电动给水泵的冲击。

3.4 辅助系统的设备性能

机组FCB功能的实现需要各辅助系统的协调配合,在FCB功能实现过程中,重要辅助系统设备故障会影响机组FCB的实现,包括锅炉燃油系统、压缩空气系统、轴封系统、加热器系统和风烟系统等^[16]。以锅炉燃油系统为例,机组快速减负荷过程中需要投油助燃稳定燃烧,燃油系统设备故障导致助燃油枪在锅炉燃烧时不能及时投入运行会导致锅炉熄火,机组FCB失败。因此,机组辅助系统设备性能应能够满足实现FCB功能的需要;设备可靠性高;能够适应负荷快速变化;辅助系统设备的控制系统可靠性高,备用设备自动切换功能能够正常实现;能够满足带厂用电运行工况的要求。

3.5 水位控制

FCB动作后,汽轮机主汽门快关、旁路阀快开和安全门动作会导致循环工质流量和压力大幅度波动,进而引起凝汽器水位、除氧器水位以及循环锅炉汽包水位的变化,这将会影响机组FCB功能的实现。

在FCB实现过程中,凝汽器、除氧器以及循环锅炉汽包的水位变化超出机组保护设定值时会导致锅炉跳闸而FCB失败。因此,在实现机组FCB功能过程中,应加强监视凝汽器水位,控制凝汽器水位在安全范围内;加强除氧器水位的控制,FCB动作后应快速切换除氧器加热汽源,及时调整凝结水流量,控制除氧器水位在安全范围内;汽包水位控制方式应当保持在三冲程控制或者及时切换为手动控制,确保FCB实现过程中汽包水位在正常值范围内^[17]。

3.6 锅炉燃烧控制

在机组FCB动作后的控制中,锅炉燃烧控制难度最大。燃烧控制不当触发锅炉MFT动作是导致机组FCB失败的一个重要原因。

FCB动作后,汽轮发电机组甩负荷,主汽门关闭,为抑止锅炉压力飞升,需要迅速降低燃烧负荷。在额定负荷下实现FCB功能,锅炉燃烧负荷降低的速度和幅度最大,燃烧控制的难度也最大。因此,为确保FCB功能的成功实现,应加强锅炉燃烧控制,避免燃烧负荷下降过程中锅炉内燃烧波动过大。机组FCB动作后,应逐台减少磨煤机给煤量,并按照一定时间间隔,从上到下停止磨煤机的运行;风烟系统的调整与燃烧调整配合得当,避免燃烧负荷调整过程中炉膛压力波动过大;对于配置大旁路系统的机组,可以在机组旁路配合下逐步降低锅炉燃烧负荷。

3.7 运行操作经验

FCB功能的成功实现除需要各主、辅系统共同参与,也需要在运行人员操作下调整重要的运行参数。这要求在FCB动作后,运行人员能够快速且准确地对机

组运行状态做出判断,并及时进行相应的操作。然而,在实际运行中,导致机组FCB动作的事故大多是突发性的,FCB动作后留给运行操作人员判断和操作的时间往往很短。当运行人员因判断失误而误操作,或者反应迟缓而操作延迟时,会导致机组FCB失败。因此,对于拥有仿真培训系统的电厂,应当充分利用自身条件,通过仿真培训来增强运行人员在FCB实现过程中的操作经验,提高机组实现FCB的能力。

综上所述,影响机组FCB功能成功实现的因素多而复杂,需要在机组设计、运行和设备改造维护等环节加强建设,包括在机组设计时考虑实现FCB功能的要求,对已投运机组根据机组实际情况进行设备改造、系统优化和控制优化,并采取措施提高运行控制水平等,以保证机组实现FCB功能的能力。从电网黑启动和快速恢复的要求来看,具有FCB功能的火电机组具有作为黑启动电源的潜力,更重要的是,当电网停电时如果有相当数量的火电机组处于带厂用电运行的状态,则可随时恢复上网供电而不是等待被启动,这无疑对电网快速恢复十分有利。

4 结束语

火电机组FCB功能的实现和应用有利于电网大面积停电后的黑启动、快速恢复供电和减少停电带来的损失。近年来我国对电网供电安全性极为重视,但在火电机组FCB功能应用的重视程度和相关服务管理方面与国外仍有较大差距,需要在相关管理服务政策和技术规范方面加强建设。影响机组FCB功能实现及应用于电网黑启动过程的因素多,涉及系统配置、设备性能和控制以及运行等诸多方面。虽然我国对火电机组FCB功能的试验研究较多,但针对其应用于电网黑启动和恢复供电方面的研究还很少,而且具有较强FCB能力的机组并不多,因此有必要进一步加强对火电机组FCB功能的系统研究和建设,为电网安全性建设提供足够的技术支持。

参考文献:

- [1] 钟慧荣. 电力系统黑启动与网架重构优化技术研究[D]. 河北: 华北电力大学电气与电子工程学院, 2012.
- [2] 冯伟忠. 1000 MW 超超临界机组FCB试验[J]. 中国电力, 2008, 41(10): 62-66.
- [3] Island Operation Tests in a SCC-800 CHP Plant-an Example from an Operating Plant in Sweden[R]. Goran Tjellander, Sweden, 2008.
- [4] GADDA E, RADICE A. Load Rejection Operation in Conventional Power Plants in ENEL-Italy[J]. Transactions on Energy Conversion, 1989, 4(3): 382-391.
- [5] DELFINO B, DENEFRIG B, INVERNIZZI M. Steam Power Plant Re-powering to Provide Black-start Ancillary Service and Speed up Power System Restoration[C]//Bologna Power Tech Conference. Bologna, Italy: University of Genoa, 2003: 7803-7967.

- [6] 大木隆平,谷村荣次期. FCB 系统在变压运行超临界直流锅炉中的应用[J]. 石川岛播磨技报,1981,21(5):19-28.
- [7] 田 丰. 700 MW 机组 FCB 试验分析[J]. 动力工程,2002,22(4):1872-1874.
- [8] Suruhanjaya Tenaga, The Malaysian Grid Code[EB].[2010-08-02]. <http://www.tnb.com.my/business/malaysian-grid-code.html>.
- [9] 郑 贇. 印度工程汽轮机旁路容量的选型设计[J]. 热力透平,2012,41(3):209-214.
- [10] 姚纪华,江哲生,张春极. 宝钢电厂 35 万千瓦机组快速切回(FCB)连锁控制系统性能试验[J]. 热力发电,1984(6):27-34.
- [11] 姜 道,徐 建. 某厂 2×110 MW 机组 DEH 带小网厂用电控制改造[J]. 科技风,2010(2):236-244.
- [12] 侯小龙,田云峰. 国产 200 MW 机组甩负荷及小岛运行试验[J]. 华北电力技术,2004(6):1-13.
- [13] 刘海燕. 300 MW 汽轮发电机组的小岛运行试验[J]. 电站系统工程,2011,27(3):45-46.
- [14] 罗志浩,尹 峰. 国产 600 MW 超临界直流机组实现 FCB 功能的可行性研究[J]. 浙江电力,2009(1):16-19.
- [15] 王伟红,张旭航. 基于快速甩负荷(FCB)的上海 500 kV 电网黑启动 RTDS 仿真研究[J]. 华电电力,2011,39(6):901-903.
- [16] 梁 梅. 某发电机组压缩空气母管压力频繁波动问题分析与改造[J]. 江苏电机工程,2013,32(3):71-77.
- [17] 薛江涛,彭 辉. 660MW 超超临界机组甩负荷快速并网策略试验研究[J]. 江苏电机工程,2010,29(6):71-73.

作者简介:

门 冉(1989),男,河南南阳人,硕士在读,研究方向为动力工程及工程热物理;

高小涛(1967),男,江苏靖江人,高级工程师,从事火电机组调试和性能优化工作;

盛昌栋(1967),男,安徽繁昌人,博士生导师,从事煤及生物质燃烧基础研究及电站锅炉性能有关的工程应用研究。

Application and Implementation of FCB Function of Thermal Power Units

MEN Ran¹, GAO Xiaotao², SHENG Changdong¹

(1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing, 211103, China)

Abstract: The achievement of the fast cut back (FCB) function of thermal power units is of importance for fast restoration of power grid to reduce the loss after power blackout. Through analyzing the status of FCB function applications of thermal power plants around the world and the relevant experimental studies in domestics, the inadequacies in the application and research of FCB function for power grid black-start in our country are summarized. The main influential factors of achieving FCB function in thermal power units are studied. The study is aimed at providing references for promoting the research and construction of FCB function of thermal power units and the application of the FCB function in grid black-start and in China.

Key words: thermal power unit; black-start; FCB

下 期 要 目

- 基于层次分析的网络备自投方案评估
- 地区电网与新能源无功电压协调控制
- 慢充和换电方式下的电动汽车充电负荷计算
- 浅谈电力大数据对信息运行的影响
- 一起 220 kV 变压器绕组变形故障分析
- 低 NO_x 燃烧器改造后水冷壁横向裂纹原因及治理
- 定制电力实验室的开发与建设
- 一种小模拟量输入电能表检定装置的研制
- 双馈风机转子侧变流器不平衡控制策略
- 基于根轨迹法的链式 STATCOM 比例谐振电流控制器设计
- GIS 内典型绝缘缺陷的局部放电信号超声特性分析

广 告 索 引

江苏省电力设计院	封一	远东电缆有限公司	(黑白) 文前
南京苏逸实业有限公司	封二	江苏南瑞帕威尔电气有限公司	封三
南京南瑞继保电气有限公司	前插一	南瑞科技股份有限公司	封四
《江苏电机工程》协办单位	前插二		