

核聚变试验装置110 kV大容量变电站运行及负荷分配优化的研究

为满足国家重大科学工程项目EAST核聚变试验装置、稳态强磁场试验装置及ITER国际重大合作项目等多项试验装置的工程及试验运行,在合肥科学岛建设完成了EAST.110 kV总容量为344.5 MV·A的变电站,拥有6台主变压器,是目前国内110 kV电压等级中容量最大的变电站。在该变电站的负荷、设计情况进行介绍的基础上,分析了该变电站在大负荷试验运行时安全保障的措施,提出了从运行时间和空间上进行负荷分配优化,通过技术比较论证了其可靠性,并指出一些在运行中仍然存在的问题,对存在大容量冲击性试验负荷的变电站的设计建设提供了工程参考和借鉴价值。

仇茹嘉 刘智民 刘琼秋 汪正初/中国科学院合肥物质科学研究院



仇茹嘉/硕士研究生

关键词/Keywords

大容量变电站 ·
EAST ·
运行优化 ·
冲击负荷 ·

目前国内大部分110 kV变电站为2~3台主变压器,受10 kV开关柜生产能力的限制,单台主变压器容量一般为40 MV·A、50 MV·A和63 MV·A^[1-2]。由于EAST.110 kV变电站所承担的负荷特殊、用电需求大,终端变电站总容量为344.5 MV·A,拥有31.5 MV·A、63 MV·A、50 MV·A、100 MV·A、60 MV·A和40 MV·A共6台主变压器。此总容量参数是目前国内110 kV电压等级变电站中容量最大的。从时间和空间两方面优化了EAST.110 kV变电站的常态运行,并对其故障态的处理进行了分析,希望为大容量冲击性试验负荷变电站的运行、调控等提供参考。

EAST.110 kV变电站设计

图1为EAST.110 kV变电站三维示

意图。

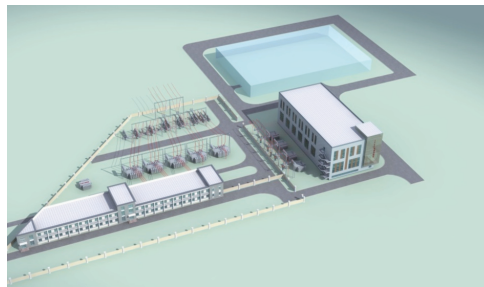


图1 EAST.110 kV变电站示意图

1. 电气主接线和设备情况

EAST.110 kV变电站的负荷以二类科研负荷为主,根据国家电网110 kV变电站通用设计规范,二级负荷用户和设备的供电措施,二级负荷的供电系统应做到当电力变压器或线路发生常见故障时,不致中断供电或中断供电能及时恢复^[3],因此变电站采用双电源供电方式。依据设计时供电回路建设,两条110 kV进线一条为陶楼变电站专供线路,称为合董线;另一条由合肥植物园变电站接出,称为董支线。目前,基于合肥市220 kV电网系统的发展状况,EAST.110 kV变电站进线系统将调整为由四里河220 kV变电站两台主变压器各接出一条110 kV专供线路供电。高压110 kV侧为双母线分列运行,两条进线分别为两条110 kV母线供电,互为暗备用,保证任意一条进线或母线故障时变电站的正常运行和不失负荷。研究表明,110 kV变电站高压侧分列运行情况下系统稳定性最好,电压恢复最快^[4-5]。低压侧为10 kV单母线分段接线。因此EAST.110 kV变电站为合肥市110 kV电网终端变电站,其安全与否直

国家高技术产业发展项目计划(发改高技[2010]1457号),国家磁约束核聚变发展研究专项(2013GB101000)。

接影响合肥110 kV电网。

2003年10月投入运行时总装机容量为81.5 MV·A, 由两台主变压器组成, 容量为31.5 MV·A和50 MV·A, 可以并联运行。迁移增容后针对存在大量二级负荷的特殊性, 为提高供电可靠性^[6], 减小试验负载之间的相互影响, 增加了2[#]、4[#]、5[#]和6[#]主变压器, 共6台110 kV主变压器, 总装机容量为344.5 MV·A, 1[#]主变压器31.5 MV·A, 2[#]主变压器63 MV·A, 3[#]主变压器50 MV·A, 4[#]主变压器100 MV·A, 5[#]主变压器60 MV·A, 6[#]主变压器40 MV·A。电压等级均为110/10 kV。图2为EAST供电系统网络组成, 图3为EAST.110 kV终端变电站电气接线图。

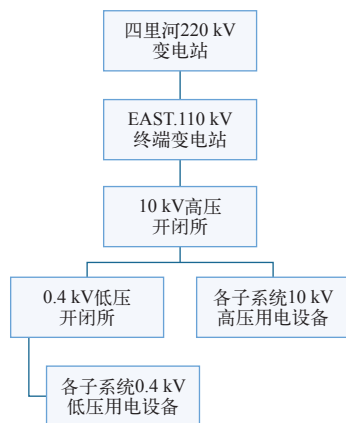


图2 EAST供电系统网络组成

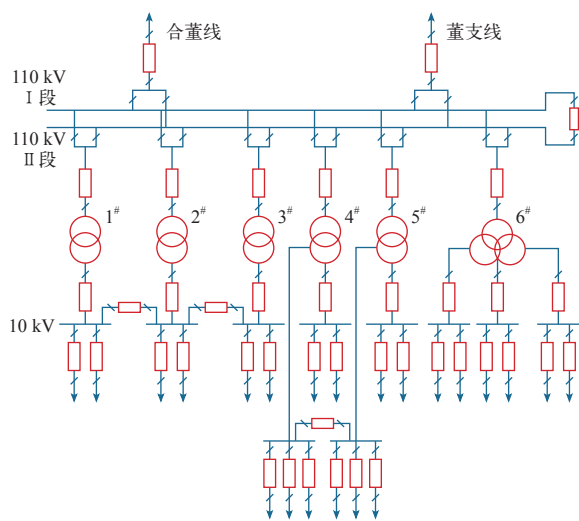


图3 EAST.110 kV终端变电站电气接线图

变电站110 kV配电装置采用共箱式GIS组合电器, 屋外布置。10 kV配电装置采用真空断路器中

置式开关柜, 户内单列布置, 断路器为固封极柱式。配有PS6000集中组屏微机综合自动化系统, 五防闭锁模拟操作装置以及容量为4 800 kvar的系统电容器补偿装置。由于低压侧整流设备较多, 在相应站点装设有电能质量监测装置, 用于实现对并网点谐波分量的监测。

2. 特殊性和意义

按照《国家电网营销(2007)》655号文规定, 110 kV电压等级最大供电容量为100 MV·A, 安徽省电网规定110 kV电压等级一般最大供电容量为126 MV·A(2011年以前规定), 最大不得突破150 MV·A(2011年以后新规定)。为此EAST.110 kV终端变电站在增容改建时, 电力相关部门曾建议直接建设220 kV变电站, 考虑到各种综合因素, 最终方案是将原110 kV变电站进行迁移增容。因此, 原110 kV变电站内1[#]、3[#]变压器、110 kV线路和设备等均可重新利用, 节约采购投资降低至少50%成本。但另一方面, 为了维持110 kV电压等级不变, 单个变电站主变压器数量、总容量将大大高于普通110 kV变电站, 双母线供电方式下两条110 kV线路总容量为200 MV·A, 小于所挂变压器总容量, 运行的可靠性和安全性如何保证等因素是变电站设计建设时必须予以考虑的问题。系统设计建成后, 为了满足负荷的需要, 变电站的运行、调度情况也较为复杂, 对变电站运行人员的调度工作、变电站的各类保护设备等也提出了较高的要求。EAST.110 kV终端变电站的安全可靠运行, 在越来越多的变电站成为负荷型的终端变电站的今天^[7], 对存在大容量冲击性试验负荷的用电单位的变电站设计和建设有着很高的参考价值。

EAST.110 kV变电站的常态运行

EAST.110 kV变电站增容扩建后已安全运行3年多, 以下在简要介绍负荷等基本情况的基础上, 结合具体试验期间的运行数据, 分析三年来变电站运行中优化负荷分配及提高可靠性的具体途径。

1. 目前运行及负荷情况

变电站负荷均为二类、三类负荷, 其中以二类科研负荷为主, 三类负荷仅为常规及民用电负荷。

EAST.110 kV终端变电站的6台110 kV主变压器中, 1[#]、2[#]和3[#]主变压器为EAST装置试验专用变压器; 4[#]、5[#]主变压器为ITER极向场电源测试平台专用变压器; 6[#]主变压器为稳态强磁场电源专用变压器。其中, 1[#]主变压器下挂有常规及民用电负荷, 包括东区变电所、各大办公楼照明用电以及EAST试验进行中需要不间断运行的低温系统、真空系统, 6[#]主变压器为其提供备用供电进线。目前由合董线为1[#]、6[#]主变压器供电, 由董支线为2[#]、3[#]、4[#]主变压器供电, 5[#]主变压器暂未投运。

2. 大试验负荷下的安全运行

合肥科学岛大试验负荷运行项目主要有EAST物理试验(春季、秋季), ITER测试试验以及强磁场试验。根据常规运行经验, 全岛常规及民用电负荷维持在5 MW左右, 远景预测EAST辅助加热装置负荷为45 MW, EAST磁体装置负荷为45 MW左右, ITER测试装置最大负荷约为40 MW。远景年最大负荷为120 MW左右。EAST.110 kV变

电站远景用电负荷预测数据如表1所示。

(1) 调整时间优化运行

由于EAST.110 kV变电站线路和变压器容量无法同时满足所有试验负载满负荷时的安全运行, 通过总体协调在保障各套大型装置试验任务完成的条件下, 经过变电站运行人员和各试验负责人的合作沟通, 提前对各大负荷试验进行规划和安排, 以在时间上实现负荷的优化分配。为保证各试验装置的正常进行及互相无影响, 制定了试验运行理论原则, 并据此提前计划3项大负荷试验运行安排, 在试验时间上对负荷分配进行优化, 相关运行主变压器配置原则如下, 确实需要进行时可与供电部门协调整。

1) 各项试验计划不安排在低温月(1月份)和高温月(7月份), 避开合肥地区用电负荷高峰期。

2) 1[#]主变压器(31.5 MV·A)负责常规及民用电, 全年带电运行。

3) EAST春季物理试验安排在2月、3月和4月, EAST秋季物理试验安排在10月、11月和12月。相关

表1 EAST.110 kV变电站远景用电负荷预测数据

试验装置	负荷系统	基本指标		电源性质	估计电负荷(最大)	预计运行模式		拟挂配电变压器
		波束功率/MW	网侧功率/MV·A		S/MV·A	0~满负荷	满负荷	
EAST 辅助加热	NBI 80keV 系统	8	预计36	不控整流24脉波直流 高压PSM串联	36	100 μs	100 s (cw)	3 [#] 主变压器
	ICRF110M 系统	4.5 后期3	预计12 后期8	不控整流24脉波直流 高压PSM串联	20	>200 ms	1 000 s (cw)	3 [#] 主变压器
	LHCD2.45G 系统	4	预计10	相控整流12脉波直流 高压PSM串联	10	>200 ms	1 000 s (cw)	3 [#] 主变压器
	LHCD4.6G 系统	6	预计15	不控整流24脉波直流 高压PSM串联	15	>200 ms	1 000 s (cw)	3 [#] 主变压器
	ECRH140G 系统	4	预计10	不控整流24脉波直流 高压PSM串联	10	100 μs	100 s (cw)	3 [#] 主变
EAST磁体	PF+TF电源 系统		预计50	相控整流12脉波感性 负载无功补偿	50	>100 ms	1 000 s (cw)	2 [#] 主变压器
EAST低温	低温系统		预计5	常规电源	5	>1 s	1 000 s (cw)	1 [#] 主变压器
EAST纯水	水冷系统		预计2	常规电源	2	>1 s	1 000 s (cw)	1 [#] 主变压器
EAST真空	真空系统		预计1	常规电源	1	>1 s	1 000 s (cw)	1 [#] 主变压器
强磁场	磁体电源		预计40	相控整流12脉波感性 负载无功补偿	30	>100 ms	cw	6 [#] 主变压器
ITER测试	测试平台		80	相控整流12脉波	80	和上述装置不同时运行		4 [#] 主变压器
ITER测试	测试平台		60	感性负载无功补偿	60			5 [#] 主变压器

的运行主变压器有 2[#]主变压器（63 MV·A）和3[#]主变压器（50 MV·A）。

4）ITER测试试验安排在8月、9月，相关的运行主变压器为：4[#]主变压器（100 MV·A）、5[#]主变压器（60 MV·A）。8月、9月份也是电网负荷的高峰期，ITER测试试验可根据调度安排，合理调整试验时间，避开用电高峰期。ITER测试平台电源为相控整流12脉波感性负载无功补偿，所用4[#]、5[#]变压器容量为140 MV·A，与其他装置不同时运行。

5）强磁场试验安排在5月、6月、11月和12月。相关的运行主变压器为6[#]主变压器（40 MV·A）。

6）大型试验装置运行前，提前向供电部门提交试验计划安排申请，暂时提高实验负荷可靠性级别，保证试验期间不断电。表1为EAST.110 kV变电站远景用电负荷预测数据。

EAST.110 kV变电站远景年度配电负荷运行计划预测数据如表2所示。由表2可知，EAST.110 kV

变电站所带负荷主要为脉冲性试验负荷，常规及民用用电负荷常年仅维持在5 MW左右。因此任何一台主变压器退出运行时，其他变压器完全有能力维持变电站的正常运行。这与普通110 kV变电站所带以常规负荷为主、负荷波动相对平稳的情况有很大区别，因此也为EAST.110 kV变电站在设计时采用主变压器总容量超出普通110 kV变电站、线路容量低于主变压器满载容量的特殊设计方案提供了可行性。

以2014年夏季进行EAST装置物理试验时的负荷状况为例，试验开始前，变电站稳定负荷仅为5 MV·A左右。EAST试验期间暂时停止运行其他大型试验装置，从2014年5月15日开始进行EAST装置降温 and 抽真空运行，直到2015年10月24日正式结束EAST试验，期间由于试验特性，存在短时脉冲性负荷波动和冲击，110 kV有记录的最高峰值达到40 Mvar。但均为短时间负荷脉冲，持续时间为秒级，通过设备交错开起和变电站运行人员的调

表2 EAST.110 kV变电站远景年度配电负荷运行计划预测数据

	低温月	EAST春季物理试验				强磁场试验		高温月	ITER测试试验		EAST秋季物理试验		
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
1 [#] 主变压器	常规及民	常规及民	常规及民	常规及民	常规及民	常规及民	常规及民	常规及民	常规及民	常规及民	常规及民	常规及民	常规及民
31.5 MV·A	用5 MW	用5 MW	用5 MW	用5 MW	用5 MW	用5 MW	用5 MW	用5 MW	用5 MW	用5 MW	用5 MW	用5 MW	用5 MW
2 [#] 主变压器	EAST磁体48 MW												
63 MV·A	EAST磁体48 MW												
3 [#] 主变压器		EAST	EAST	EAST							EAST	EAST	EAST
50 MV·A		辅助加热	辅助加热	辅助加热							辅助加热	辅助加热	辅助加热
		46 MW	46 MW	24 MW							46 MW	46 MW	24 MW
4 [#] 主变压器													
100 MV·A									ITER测试1	50 MW			
5 [#] 主变压器									ITER测试2	50 MW			
60 MV·A									ITER测试3	10 MW			
									共约60 MW				
6 [#] 主变压器					强磁场试验 28 MW (稳态运行, 从0 MW 上升到28 MW不小于 50 s, 下降速度也不小 于50 s, 每日额定负荷 时间小于3 h)				强磁场试验20 MW (稳态运 行, 从0 MW上升到20 MW不小于 50 s, 下降速度也不小于50 s, 每 日额定负荷时间小于3 h)				
40 MV·A													
总计/MW	5	99	99	77	32	32	5	115	115	99	119	97	
性质	80%为脉冲性负荷 (1 000 s占空10 000 s)												

度完全可以将负荷脉冲错开,从而实现大负荷试验的安全运行。

(2) 空间优化运行

在大型试验装置的实际运行中,变电站运行技术人员可根据实际需要,在一定范围内调节供电母线和变压器上的负荷分配,以实现更可靠的运行。负荷调节需要遵循以下原则。

1) 线路、变压器不能过载,因为许多负荷为冲击负荷,需要一定容量裕度。

2) 对于重要负荷建议分两段母线分别供电,有多条进线的10 kV母线可以从不同变压器引入进线。比如63 MV·A主变压器和31.5 MV·A主变压器均为EAST装置专用主变压器,可以分挂两条母线上。采取类似措施,以保证用电的安全性、可靠性。

3) 实际运行时考虑负荷性质的区别和供电,可以在试验期间将负荷较平稳的1[#]、6[#]主变压器挂接在一条线路上,而含有短时脉冲性试验负荷的2[#]、3[#]和5[#]主变压器挂接在另一条线路上,防止冲击对常规设备的影响。同时由于低温真空系统从起动到达到试验条件需要至少15天左右,因此试验期间必须保证其不断电运行,与冲击负荷分开供电也可提高1[#]、6[#]主变压器下接的全岛常规用电及需要长期运行的低温真空系统的供电可靠性。

EAST.110 kV终端变电站投运后故障分析

由于EAST.110 kV变电站出线 and 负载众多,设计时难免有未考虑全面的问题,以下将运行3年来暴露出现的典型问题进行简要说明和分析。

1. 负载异常情况

ITER测试平台是全岛最大的冲击性负荷,由于进行的试验多为短路试验,对其他负荷不可避免有所影响。虽然ITER试验由5[#]、6[#]主变压器专供,但ITER交流试验平台下挂在2[#]主变压器,同时2[#]主变压器下挂有EAST各子系统的测试平台电源,如2[#]-2直流高压电源为NBI系统测试平台的高压电源等。由于ITER交流试验与各测试平台均需在EAST物理试验不进行的月份进行试验,ITER交流测试平台的大电流试验可能会引起测试平台

电源的误跳闸甚至损坏。以2013年12月的ITER试验为例,当年12月份ITER测试平台进行了为期20多天的交流封闭母线试验和直流隔离开关试验,包括350 kA动稳定试验、直流隔离开关的350 kA冲击电流试验和60 kV冲击电压试验,而同时NBI系统测试平台也在开展离子源的测试。由于这次大电流试验期间冲击试验直接导致2[#]-2直流高压电源全部跳闸报警,影响到NBI离子源测试试验全部掉电被迫暂停。因此如何将ITER交流平台与测试平台的相互影响降到最低是下一步变电站运行人员和相关试验人员需要协调考虑的问题。

2. 供电线路异常情况

由于EAST.110 kV终端变电站位于合肥110 kV电网终端,其可靠运行也受合肥电网稳定性的影响,是否能在供电网络出现部分故障时保障基本用电稳定也是对变电站的考验。因此在设计时,单台变压器均设计为容量可以保证全岛常规和部分特殊试验设备的供电。例如今年夏季EAST实验运行期间,2014年7月23日上午发生了一起由于全市夏季用电高峰部分地区负荷过载导致一条进线失电。事故发生后变电站紧急将母联断路器投上,同时为防止线路过载,除保障全岛常规负荷、正在进行的EAST试验的低温真空系统正常供电外,将其他试验负载关停,全力将失电影响降至最低,最终安全平稳渡过供电抢修期。但仍有部分问题在此次失电事故中暴露,如降负荷运行时,需要维持供电的负荷可能没有集中在某个别变压器下或某一段10 kV母线分段上,因此导致维持该负载供电时存在损耗大、效率低或可靠性降低的问题。

结束语

通过介绍国内最大总容量110 kV变电站EAST.110 kV终端变电站的设计建设及运行,针对大容量冲击性试验负载在变电站运行中的可能问题,分析了该变电站投运3年来在大负荷试验装置下的运行情况和负荷调度方案。

时间上,提前对存在大容量负荷的试验进行规划安排,将可能产生的用电高峰尽量内部消

化,同时加强与供电部门的联络,避开所在电网的用电高峰,起到了一定的错峰填谷的作用;空间上,制定负荷调度原则,合理利用6台主变压器的容量,并将不同性质的负载分别供电,以保证对常规负载的可靠运行。

针对运行中可能出现的问题作简要探讨,对存在大容量冲击性试验负荷的变电站的设计建设和运行调度提出了工程参考和借鉴价值。

参考文献

- [1] 屠三益,唐德光,沈世媛,等.上海市35 kV、110 kV、220 kV变电站最佳容量探讨(一)[J].上海电力,1996,9(1):19-22.

- [2] 李季春.寺河110 kV变电站一次系统设计综述[J].煤炭工程,2004(3):7-10.
- [3] 国家电网公司办公厅.Q/GDW 203—2008 110 kV变电站通用设计规范[S].
- [4] 糜作维.地区电网110 kV母线运行方式安排分析[J].电力学报,2009,24(6):518-520.
- [5] 杨珉.110 kV变电站运行接线形式及调度运行的探讨[J].通信世界,2014,7(13):42-43.
- [6] 赵雪菲.110 kV变电站设计[D].北京:华北电力大学,2012.
- [7] 张小兵.110 kV变电站建设的注意事项[J].科技传播,2013(23):42-47.

(收稿日期:2015-04-28) EA

(上接第71页)

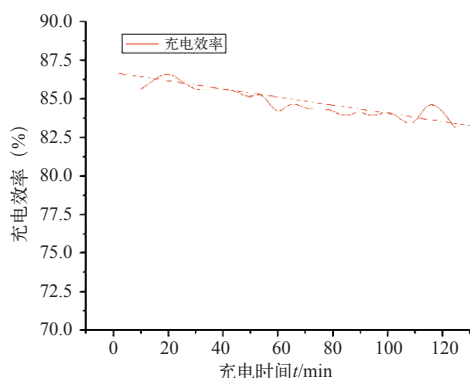


图8 动力电池充电效率变化波形

电效率低的问题从线圈形状、结构、匝数、匝间距、绕制方法和材料选择等方面进行研究和计算,以提高线圈间互感、线圈耦合度。设计了一台功率为6.5 kW的电动汽车无线充电的试验装置,采用磷酸铁锂动力电池组进行充电试验,实际充电效率维持在80%以上,满足装置设计要求。

参考文献

- [1] Nikola T. The transmission of electrical energy without wires[J]. Electrical World and Engineer, 1904(5):566-572.

- [2] Nikola T. World system of wireless transmission of energy[J]. Telegraph and Telegraph Age, 1927, 10(16):1510-1515.
- [3] Brown W C. Thermionic diode rectifier[J]. Microwave Power Engineering, 1968(1):295-298.
- [4] Brown W C. The combination receiving antenna and rectifier[J]. Microwave Power Engineering, 1968(2):273-275.
- [5] André Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007(83):317.
- [6] 黄学良,谭林林,陈中,等.无线电能传输技术研究与应用综述[J].电工技术学报,2013,28(10):1-11.
- [7] Huh J, Lee S W, Lee W Y, et al. Narrow-width inductive power transfer system for online electrical vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12):3666-3679.
- [8] 赵争鸣,张艺明,陈凯楠,等.磁耦合谐振式无线电能传输技术新进展[J].中国电机工程学报,2013,33(3):1-13.

(收稿日期:2015-06-15) EA