

华龙堆型核电机组公用配电系统设计研发

王志坚，盛 龙，孙 瑶

(中国核电工程有限公司，北京 100840)

摘要：在华龙堆型三代核电的型号研发工作中，电气专业人员进行了许多重大的原创性研发设计。其中，在电气主接线的公用配电系统部分开展了一系列卓有成效的创新工作。首先简要叙述了公用配电系统在M310二代加机组中的设计理念，分析了其不同工况下的运行方式；其次本着不降低供电可靠性的原则，从主辅电源自动切换、备用电源手动切换和多电源钥匙联锁系统设计等方面，根据型号研发的需求，提出了多种公用配电系统方案；然后，通过比较各方案的优缺点，最终确定了一种满足华龙堆型三代核电需要的、安全可靠供电的设计方案；最后，对公用配电系统设计的各个主要方面进行了系统的总结，以期为后续的设计工作提供借鉴。

关键字：华龙堆型；电气主接线；公用配电系统；设计研发

Research and design of Hualong-I nuclear power plant common distribution system

WANG Zhijian, SHENG Long, SUN Yao

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract: In the model research and development work of the 3th nuclear power plant of Hualong-I, the electrical major has carried out many important original research and development designs. Among them, the Common Distribution System of the electrical main wiring has carried out a series of fruitful innovative work. Firstly, the design concept of the Common Distribution System in the M310 2nd+ unit is briefly described, and its operation mode under different working conditions is analyzed; Furthermore, in line with the principle of not reducing reliability, in terms of automatic switching of main and auxiliary power supply, manual switching of backup power supply, design of multi-power key interlocking system, according to the needs of model research and development, a variety of Common Distribution System solutions are proposed; by comparing the advantages and disadvantages of each solution, a solution that meets the requirements of the third generation of Hualong-I nuclear power plant is finally determined. The required, safe and reliable power supply design. Finally, the main aspects of the design of the Common Distribution System are systematically summarized, in order to provide reference for the subsequent design work.

Key words: Hualong-I; electrical main wiring; common distribution system; research and design

0 引言

根据对供电电源可靠性要求的不同，核电厂的厂用电设备分为单元厂用设备、常备厂用设备、厂区公用设备和应急厂用设备。为这些设备供电的电源母线相应地被称为单元母线、常备

母线、公用母线和应急母线。其中，为厂区公用设备供电的电气系统称为公用配电系统（ESH、ESI），其主要功能是为核电厂厂区公用设备供电，如变压器、空压机和冷水机组等。

在华龙堆型三代核电机组的研发设计工作

中，优化前的电气主接线如图1所示。

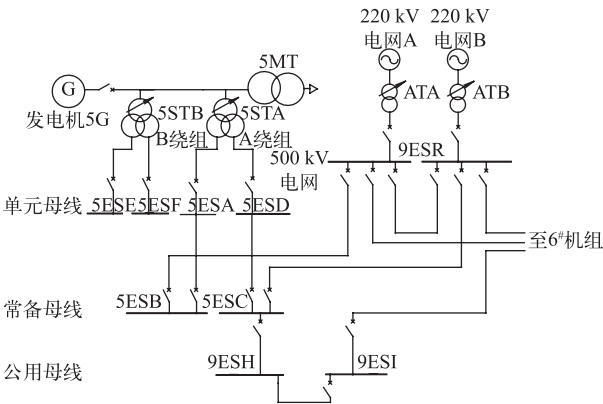


图1 华龙堆型原有电气主接线（负荷未优化）

Fig. 1 The original single line (before optimization)

在核电厂厂用电系统接线方案审查工作中，其根据各电厂相关工艺专业的用电设备需求，利用换算系数法，在进行厂用电负荷统计时，得到数据见表1。

表1 厂用负荷统计表（高压厂用变压器供电）

Tab. 1 Plant load statistics (powered by auxiliary transformer)

(单位: kV·A)

母线名	计算负荷容量 (kV·A)
ESA+ESB 段	30 021
ESC+ESD 段 (为 ESH/ESI 供电)	38 840
ESE 段	22 558
ESF 段	24 100

由表1可看出，公用配电母线ESH/ESI负荷较重，且需要考虑ESH和ESI同时由1台机组厂用电供电的情况。结合图1可知，高压厂用变压器5STA绕组A负荷较重，高压厂用变压器5STA容量选择80/40-40 MV·A。高压厂用变压器5STB所带负荷较轻，可选择40/25-25 MV·A。考虑到整个厂内其他机组的运行检修方便（其他已建成核电机组高压厂用变压器均为68/34-34 MV·A），备品备件互换灵活，因此高压厂用变压器5STB的容量选用68/34-34 MV·A。

此方案沿用了大亚湾、岭澳核电站以及之前各核电机组的接线方案，可供参考的数据和经验较多，且已通过运行实践的考验。但存在的一个明显的问题是，两台高压厂用变压器的容量极

不平衡，高压厂用变压器5STA的两个低压绕组容量也有较大的不平衡，不利于备品备件的灵活互换。

综上，考虑到ESE、ESF段负荷较小，如果将ESH、ESI母线由ESC母线供电改为由ESF母线供电，并将ESE和ESF母线所带负荷进行微调以保证两个绕组负荷平衡，得到图2所示的负荷优化后接线方式，负荷统计数据见表2。

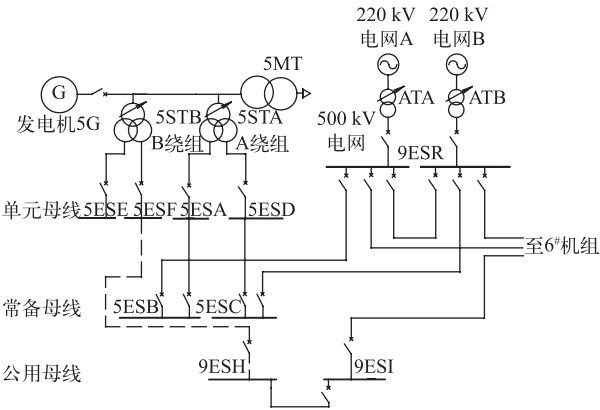


图2 华龙堆型原有电气主接线（优化后）

Fig. 2 The original single line (after optimization)

表2 厂用负荷统计表（调整 ESH、ESI）

Tab. 2 Plant load statistics (adjust ESH/ESI)

(单位: kV·A)

母线名	计算负荷容量
ESA+ESB 段	29 616.35
ESC+ESD 段	29 204.79
ESE 段	31 082.36
ESF 段 (为 ESH/ESI 供电)	25 472

图2中虚线部分为供电路径的变动部分。由表2可以看出，将公用配电母线ESH、ESI从ESC供电调整到ESF供电，并微调ESE和ESF负荷分配后，使两台高压厂用变压器的4个低压绕组负荷分配相对比较平均，且留有一定的裕度。这样，此调整可以使整个核电厂址的6台机组高压厂用变压器参数相同，极大地便利了今后的检修、维护和管理，同时，将80/40-40 MV·A变压器容量降为68/34~34 MV·A，也极大地降低了设备的一次投资。

通过上述调整解决了高压厂用变压器容量

一致性和各绕组负荷平衡的问题，但由此也引出了一个新的问题，即公用配电母线ESH、ESI由ESC供电改为由ESF供电，是否满足厂区公用设备的稳定、可靠的用电需求。为解决上述疑问，了解厂用公用设备的用电需求，也就是公用配电系统在M310机组中的设计理念成为首先要解决的问题。

1 公用配电系统在M310二代加机组中的设计理念

在M310二代加机组中,厂区分公用母线LGI(三代核电改系统代码为ESH、ESI)的主接线如图3所示。

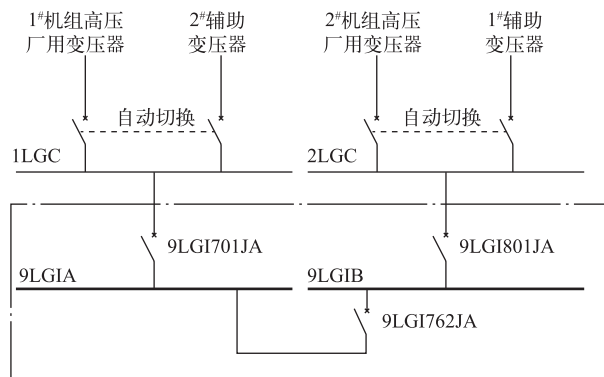


图 3 9LGI 系统主接线示意图

Fig. 3 The single line of 9LGI

图3中的厂区公用母线9LGIA、9LGIB组成公用配电系统，为核岛和BOP两个机组公用和厂区公用的设备供电。9LGIA母线平常由1LGC供电，9LGIB母线平常由2LGC供电。LGC母线按机组的不同运行方式由各自的高压厂用变压器或辅助变压器供电，设有切换装置，可对LGC进线开关进行供电电源的自动切换。9LGIA和9LGIB之间设有母联开关762JA，当一个机组故障或停电检修时，由另一个机组通过母线开关恢复供电。由此可知，对于9LGIA（9LGIB）而言，正常时，可由1[#]（2[#]）高压厂用变压器通过1LGC（2LGC）供电；1[#]（2[#]）高压厂用变压器故障或检修时，可自动切换到2[#]（1[#]）辅助变压器通过1LGC（2LGC）继续供电。当以上两个电源均失电时，可断开701JA（801JA），手动

闭合762JA，由另一机组通过母联供电。这样，9LGIA或9LGIB根据不同的运行方式，可由1[#]高压厂用变压器、2[#]辅助变压器、2[#]高压厂用变压器和1[#]辅助变压器共计4个电源供电，电源自动切换与手动切换互相配合，供电可靠性极高。

另外，图3中的点画线框为公用配电系统负责范围，除常规钥匙联锁系统设计外，开关701JA、801JA和762JA三者之间设有“三取二”钥匙联锁，有效地保证了运行人员的人身安全和设备的运行安全。701JA和801JA接收来自DCS的分合闸命令，可实现远方控制，且所有开关分合闸状态、故障等信号均送至DCS，供主控室运行人员使用。

2 华龙堆型公用配电系统一次接线的设计优化

2.1 公用配电系统供电要点分析

作为三代核电机组公用配电系统的供电可靠性必须不低于原二代加机组，经分析二代加机组的公用配电系统的设计理念，得到以下设计要点（以ESH为例，ESI同理）：

1) ESH系统正常运行时, 有高压厂用变压器和辅助变压器两个电源。当上述两个电源失电时, 手动关合ESH与ESI之间的母联开关, 可从另一机组或另一辅助变压器获得供电。通俗地讲, ESH有4个电源可以为其供电。

2) ESH系统正常运行时, 由高压厂用变压器提供电源。当失去高压厂用变压器电源时, 由切换装置自动切换到辅助变压器供电。

3) ESH系统正常运行时, 均有高压厂用变压器和辅助变压器两个电源。当上述两个电源失电时, 手动关合ESH与ESI之间的母联开关, 可从另一机组或另一辅助变压器获得供电。上述ESH和ESI之间母联开关的操作是手动进行的, 即从另一机组或另一辅助变压器获得电源时是手动切换的。

4) 为保证人员的人身安全和设备的运行安全, 核电厂设有钥匙联锁系统进行五防保护。现有主接线的钥匙联锁方案成熟, 逻辑清晰, 满

足电源自动切换与手动切换相结合的需要，简便易行。

从以上分析可以看出，简单地将ESH改由ESF供电后，由于ESF母线为单元母线，无辅助变压器供电，ESH也无法由辅助变压器供电。因此为保障ESH供电的可靠性，其系统接线方案须进行必要的优化调整。

2.2 优化接线方案的比选

基于上述设计要点，初步提出了两种优化接线方案。

优化方案A如图4所示，因ESF母线无辅助变压器供电路径，将ESH改由ESF供电后，ESH也因此缺少辅助变压器供电电源。所以，为ESH增加一路辅助变压器电源。ESI母线同理。ESH和ESI之间设母联开关。对于ESH母线来说，正常时由1ESF供电，1ESF母线失电时，由电源自动切换装置，自动打开001JA，闭合002JA，由2[#]辅助变压器电源为ESH母线供电。当1[#]机组高压厂用变压器和2[#]辅助变压器均无电源时，手动将001JA和002JA均打开，手动闭合母联开关005JA，由另一机组或另一辅助变压器为ESH母线供电。ESI母线同理。这样，从供电电源角度，初步保证了公用配电系统的可靠性，也满足了主辅电源自动切换、备用电源手动切换的要求。

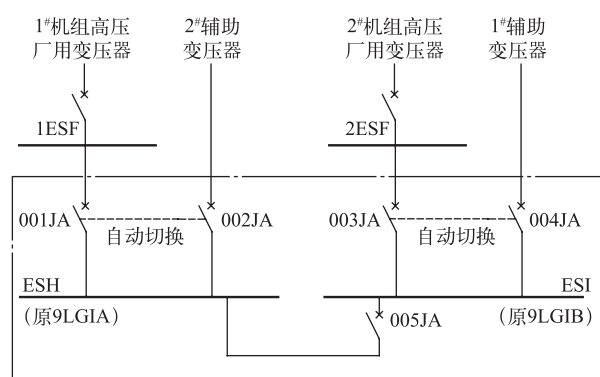


图4 优化接线方案A

Fig. 4 Optimal wiring scheme A

但是，对于ESH而言，有两个进线开关001JA和002JA；对于ESI而言，也有两个进线开

关003JA和004JA；ESH和ESI之间有一个母联开关005JA。对于钥匙连锁系统而言，如果要闭合母联开关005JA，就必须保证001JA和002JA断开，或003JA和004JA断开。另外，钥匙连锁系统的设置还不能影响001JA和002JA、003JA和004JA之间的电源自动切换关系。经深入研究发现，依据方案A设计出的钥匙连锁方案十分不成熟，无应用先例，逻辑复杂繁冗，在进行手动关合母联开关操作前，须进行极为复杂的钥匙逻辑操作，出错概率较大，不宜采用。

优化方案B如图5所示，因ESF母线为单元母线，无辅助变压器供电路径，将ESH改由ESF供电后，ESH也因此缺少辅助变压器供电电源。所以，为ESH增加一路辅助变压器电源。同时，参考秦山核电气主接线思想，将ESH和ESI之间的母联开关取消，额外为ESH母线再增加一路接至2ESF母线的回路。ESI母线同理。这样，对于ESH母线来说，正常时由1ESF供电，1ESF母线失电时，通过电源自动切换装置，自动打开001JA，闭合002JA，由2[#]辅助变压器电源为ESH母线供电。当1[#]机组高压厂用变压器和2[#]辅助变压器均无电源时，手动将001JA和002JA均打开，手动闭合003JA，由另一机组的2ESF母线为ESH母线供电。ESI母线同理。这种方案相对于M310机组接线方案，ESH和ESI均少了一路辅助变压器进线，供电可靠性有所降低。

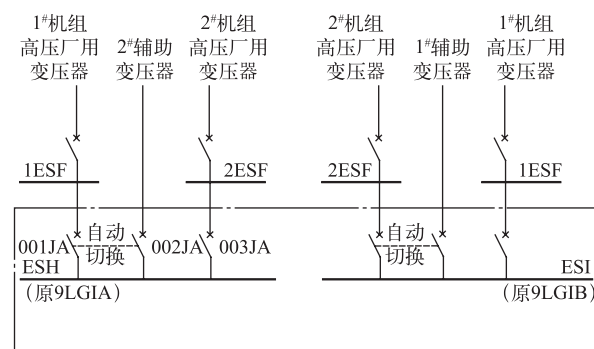


图5 优化接线方案B

Fig. 5 Optimal wiring scheme B

另一方面，对于ESH而言，有开关001JA、002JA和003JA三个进线；对于钥匙连锁系统而言，如果要闭合开关003JA，就必须保证001JA

和002JA断开。另外，钥匙连锁系统的设置还不能影响001JA和002JA之间的电源自动切换关系。经深入研究发现，依据方案B设计出的钥匙连锁方案虽比方案A相对简化，但也不是很成熟，逻辑比较复杂，出错概率较大，也不宜采用。

通过方案A和方案B的比选，主辅电源自动切换、备用电源手动切换相对比较容易实现。但要找出一种既满足自动切换又满足钥匙连锁系统要求的、多电源自动切换与手动切换相结合的主接线方案存在一定的困难，其主要难点在于：

1) 为防止环形供电，多电源进线开关存在类似“五取二”的钥匙连锁关系，钥匙连锁逻辑极其复杂。

2) 手动切换时，自动切换的两个开关须由“钥匙”来确认同时打开，但“钥匙”的设置与二者间的自动切换存在矛盾。

2.3 最终优化接线方案的确定

鉴于多电源切换与钥匙连锁相结合存在一定的困难，通过讨论提出一个思路，将母线分为两个层级：电源切换层和馈线层。电源切换层负责两个电源的自动切换，同时向馈线层供电。该层级的两个进线开关间因不参与“三取二”，不需要设计钥匙连锁。馈线层负责闭合母联的“三取二”连锁，并负责向下游负荷供电。因此，得到供电方案C如图6所示。

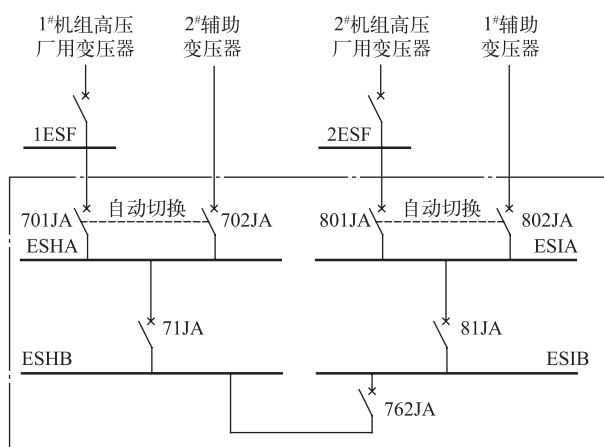


图6 优化接线方案C

Fig. 6 Optimal wiring scheme C

由图6可知，ESHA和ESIA为电源切换层。以ESHA为例，正常运行时，ESHA由1ESF通过开关701JA供电，并通过开关71JA向ESHB母线供电，进而向各BOP中压负荷供电。当1ESF失电时，由电源自动切换装置，自动打开701JA，闭合702JA，由2#辅助变压器通过702JA继续向ESHA供电。当2#辅助变压器也失电时，手动打开ESHB段母线进线开关71JA，闭合ESHB和ESIB的母联开关762JA，由另一机组或另一辅助变压器继续供电。ESI母线同理。综上，该接线方案C满足了多电源供电、电源自动切换与手动切换相结合的要求。

就钥匙连锁系统而言，除常规上下游开关互锁外，ESHA母线馈线开关71JA、ESIA母线馈线开关81JA和ESHB与ESIB的母联开关762JA进行“三取二”连锁，避免了与存在自动切换关系的701JA、702JA和801JA和802JA发生关系，符合钥匙连锁系统要求。综上，接线方案C满足前文所提出的公用配电系统供电的4个要点，从根本上使得通过负荷调整，高压厂用变压器均选用68/34-34 MV·A得以实施。

3 结束语

基于上述优化方案的施工图设计已于2018年完成，同年完成了设备的出厂验收工作。2021年初，该核电机组已全面投入商业运行，至今已完成首个换料周期，运行状态良好，该优化方案通过了工程实际的检验。

参考文献

- [1] 程法民，解玖霞，张瑞春. 公用配电线路的规划建设[J]. 科技视界, 2014(23): 295+297.
- [2] SHAALAN H, THOMPSON J, BROADWATER R et al. Distribution engineering tool features a flexible framework[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1995, 8(3): 21-24.
- [3] 邵宏，高翠萍. 城市公用配电系统存在的问题及解决方案[J]. 低压电器, 2009(23): 2095-8188.
- [4] KIM M, KIM B. The analysis for the effect on

- voltage quality of safety related bus in multi-nuclear plants[C]. 2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, 2009: 1-4.
- [5] 徐培河. 发电厂和变电站6~10kV出线开关公用配电系统瞬时电流速断保护整定计算[J]. 电工技术, 1989(9): 39-40.
- [6] 毕宇辉. 发电机组厂用保安电源供电自动切换的分析与改进[J]. 宝钢技术, 2020(5): 73-77.
- [7] 王曦. 供电企业低压台区无感知双电源自动切换装置设计与开发[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [8] 徐建. 双电源自动切换控制器及其故障处理分析[J]. 无线互联科技, 2018, 15(22): 58-59.
- [9] YANG Gangjun, CHEN Guoding, YU Suihuai, et al. The method of agile industrial design[C]. 2009 IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design, 2009: 53-56.
- [10] 吕伟峰, 徐龙. 核电厂中压柜机械钥匙联锁研究与应用[J]. 设备管理与维修, 2020(19): 138-140.
- [11] 韩伟. 换流站顺序控制和联锁[J]. 湖北电力, 2002(5): 5-8.
- [12] 全先德. 联锁在核电站电气设备中的应用研究[J]. 电力安全技术, 2016, 18(4): 32-35.
- [13] 张培杰, 孙国凯, 车长海, 等. 关于厂用电源快速切换装置切换判据的探讨[J]. 电力自动化设备, 2005(6): 91-93.
- [14] 陈医平, 蔡旭, 曹小连, 等. 厂用电切换方式探讨[J]. 电力自动化设备, 2006(11): 107-110.
- [15] SHAALAN H, THOMPSON J, BROADWATER R, et al. Distribution engineering tool features a flexible framework[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1995, 8(3): 21-24.
- [16] HUSSAIN B, BEHERA A K, BECK C E, et al. Impact of power conditioning on the life of nuclear plant auxiliary system equipment[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(3): 1884-1888.

作者简介

王志坚(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事核电厂电气系统的设计与研究。