

核电站循泵工频变频在线切换技术研究及应用

傅建军, 王东阳, 万玉晶, 杨锡宏, 徐 龙

(江苏核电有限公司, 江苏 连云港 222044)

摘要: 某电站循泵在国内核电站首次应用了变频调速技术, 系统配置为变频器加工频旁路开关, 因此循泵有工频运行和变频运行两种工作模式。两种模式之间的切换原设计为停泵切换, 导致循泵系统运行可靠性下降, 且无法根据季节性海水温度在线切换为较经济的运行模式。经过详细分析循泵电动机剩磁电压、循环水流量及系统保护配置等因素对循泵电源在线切换的影响, 对电站进行了循泵工频、变频在线相互切换技术研究及改进, 并在工程实践中实施及验证该技术的应用对后期工程循泵设计及商运机组循泵改造有着重要的参考意义。

关键词: 核电站; 变频; 工频; 在线切换; 剩磁电压; 循环水流量; 保护

Research and application of power frequency and frequency conversion online switching technology for circulating pumps in nuclear power station

FU Jianjun, WANG Dongyang, WAN Yujing, YANG Xihong, XU Long

(Jiangsu Nuclear Power Corporation, Lianyungang 222044, China)

Abstract: The circulating pump of a certain power plant has applied frequency conversion speed regulation technology for the first time in domestic nuclear power station, and the system is configured with a frequency converter processing frequency bypass switch. Therefore, the circulation pump has two operating modes: power frequency operation and frequency conversion operation. The switch between the two modes was originally designed as pump shutdown switch, resulting in a decrease in the reliability of the circulation pump system operation and the inability to switch to a more economical operating mode online based on seasonal seawater temperature. After a detailed analysis of the impact of factors such as residual magnetic voltage of the circulating pump motor, circulating water flow rate, and system protection configuration on the online switching of the circulating pump power supply, the power station has conducted research and improvement on the online mutual switching technology of the circulating pump power frequency and frequency conversion, and implemented and verified it in engineering practice. The application of this technology has important reference significance for the design of the circulating pump in later engineering and the transformation of the circulating pump in commercial units.

Key words: nuclear power station; frequency conversion; power frequency; online switching; residual voltage; circulating water flow; protection

0 引言

电厂的循环水泵（简称循泵）主要用于向常

规岛凝汽器提供冷却汽轮机做功后乏汽所需的冷却水, 保证机组正常的热力循环。某核电站采用

变频循环泵，有变频运行和工频运行两种模式，但两种模式不能在线切换，为保证机组功率稳定，循环泵全年使用变频运行方式。存在如下问题：①循环泵切换时必须先将泵完全停运，更改运行模式后再重新起动，该过程将导致机组功率大幅度下降；②循环泵变频运行时，变频器突发重故障导致变频器电源进线开关跳闸，但循环泵不能自动切换至工频运行模式，造成循环泵停运；③循环泵全年工作在变频运行模式，夏季变频器运行在50 Hz时比工频旁路运行模式消耗的电功率多，不具备运行经济性。

鉴于上述问题，对设备运行的灵活性、经济性 & 可靠性提出了严峻挑战，结合循环泵系统的配置情况、供电回路设计、保护与控制方式等，电站进行了循环泵变频运行和工频运行两种模式在线相互切换的科研探索，经过专家评审及科研结项后，先后在两台百万机组上完成了技术改造且达到了预期目标。本文对改造方案及现场设备改进后的应用情况进行介绍。

1 循环系统概况

1.1 循环水系统

电站单台汽轮发电机组配置两台循环水泵，向常规岛三台凝汽器A、B侧各供应50%的水量，凝汽器进、出口管道各自设置了电动阀，凝汽器A、B两列之间不设置联接管。在每台循环泵出口与凝汽器入口阀前，管道通过电动蝶阀与辅助冷却水系统供水母管相连，辅助冷却水系统向常规岛闭式冷却水系统的板式热交换器和凝汽器汽侧真空泵冷却器提供冷却水，将闭式冷却水系统中各个用户和真空泵设备的散热量带走并最终排入海水中，循环水系统流程图如图1所示。

1.2 润滑油系统

润滑油系统分高压油和低压油系统。低压油系统由机械油泵、一台大电动辅助油泵及一台小电动辅助油泵给循环泵齿轮箱提供低压油。正常运行时，主要是由齿轮箱驱动的机械油泵进行供

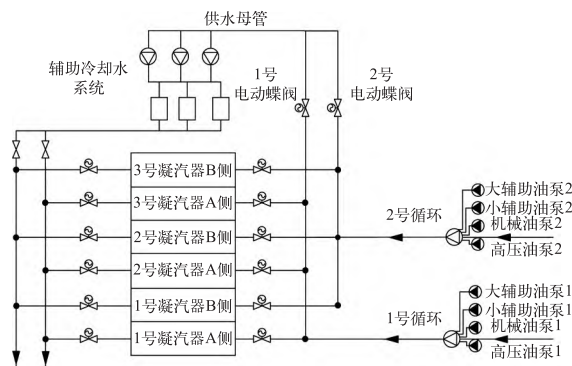


图1 循环水系统流程图

Fig. 1 Flow diagram of circulating water system

油。当循环泵低频运行，机械油泵运行无法满足润滑油系统油压时，小电动辅助油泵自动起动；当润滑油系统压力达到系统整定压力时，自动停运。当起动、停机或事故工况时，由大电动辅助油泵参与供油。

循环水泵电动机起动运转前，由于水泵转子的重力作用，使推力瓦的动静瓦块间的间隙很小，无法建立正常油膜，故在循环水泵起动和停运状态下设计高压油系统，即在电动辅助油泵起动后，供油压力达到0.16 MPa，再由高压油泵运行向推力瓦的动静瓦块间注入高压油，将转子托起10丝左右，此时电动机起动，且及时在推力瓦的动静瓦块间形成油膜，从而保障齿轮箱的正常运转。正常运转时因其推力瓦的动静瓦块间的油膜已稳定形成，高压油系统即可退出。同样，在齿轮箱退出运行惰走时，高压系统的作用也是如此，只有在转子停稳后，高压系统才允许退出运行。

1.3 循环变频系统

循环水泵采用变频技术，通过变频器+旁路配置控制循环泵电动机，系统电压等级为6.6 kV，高压变频器型号为TMEIC MVG2，采用无速度传感器矢量控制系统，容量为7 400 kV·A，循环泵电动机功率为5 800 kW。变频系统配套三台高压断路器，具体如图2所示。外部电源开关 QF_1 正常运行时一直处于闭合状态，当变频运行时，断路器 QF_4 打开，断路器 QF_2 和 QF_3 闭合；工频旁路运行时，断路器 QF_2 和 QF_3 打开， QF_4 闭合。

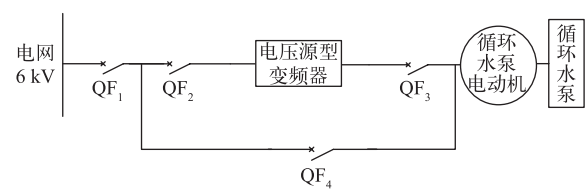


图2 循环泵变频系统图

Fig. 2 Circulating pump frequency conversion system diagram

2 循环水泵变频工频切换分析

2.1 运行经济性分析

循环变频运行工况下，根据循环水温度控制循环泵运行频率。循环水水温低于8℃时，循环泵32.8 Hz低频运行；循环水水温在8~14℃时，循环泵40 Hz中频运行；循环水水温大于14℃时，循环泵50 Hz工频运行，不同海水温度下实测的循环泵运行参数见表1。

表1 不同海水温度下循环泵运行参数

Tab. 1 Operating parameters of circulating pumps under different seawater temperatures

循环水温度 /℃	运行频率 /Hz	循环泵转速 / (r/min)	循环水流量 / (m ³ /h)	输出功率 /kW
$T < 8$	32.8	489.5	70 546	1 542.0
$8 \leq T \leq 14$	40.0	597.0	89 945	2 774.0
$T > 14$	50.0	746.0	120 285	5 150.0

冬季海水温度低，通过降低循环泵运行频率，可节省大量厂用电，但夏季海水温度高，变频器以50 Hz运行不再具备经济性。根据现场设备运行实测，每台变频器自身损耗功率为228 kW，同时伴随每台变频器运行通风冷却系统功率117 kW，即变频运行模式下比旁路运行多损耗厂用电约345 kW。为实现循环泵运行经济最优，应在海水温度低于14℃时采用变频运行模式，在海水温度高于14℃时采用工频旁路运行模式。

2.2 技术性分析

2.2.1 电动机残压分析

在变频器出现故障或手动切换操作停运循环泵时，循环泵电动机突然失去外部电源，在失电惰转过程中，电动机类似于同步发电机，定子残压的

频率主要由电动机结构和转子转速决定，而定子残压的幅值变化过程较为复杂，与电动机结构、失电瞬间电源电压幅值及相位等较多因素有关，在工程上通过实测更为方便直观。由于电动机定子残压的存在，电动机失电后，在短时间内再次供电，可能出现较大的合闸冲击电流及冲击转矩，冲击电流及冲击转矩的大小由合闸瞬间系统电压与电动机定子残压幅值及相位决定^[1]。

根据循环泵电动机厂家要求，在热态工况下允许循环泵电动机连续起动一次。也就是说，循环泵电动机本身可以满足变频供电与工频供电模式的在线相互切换。在冲击较小的情况下，循环泵可以快速恢复至正常运行状态。现场实践表明，快速切换模式对电动机自起动极为有利，但是由于要求太高，切换成功率低，根据应用数据统计，快速切换模式成功率仅在10%~20%^[2]。故本文针对残压切换进行分析，根据DL/T 1073—2007《中华人民共和国电力行业标准：电厂厂用电源快速切换装置通用技术条件》，残压切换的条件为残压幅值低于30% U_N ^[3]。为减小变频运行向工频运行切换过程对循环泵电动机的冲击，录取了50 Hz变频运行工况下电动机停运时电压随时间衰减数据，实测残压衰减曲线如图3所示。残压衰减至约30% U_N 时用时2 s，残压衰减至约5% U_N 时用时4.5 s。

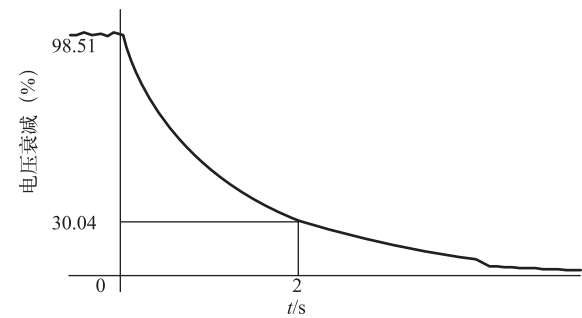


图3 循环泵电动机剩磁电压衰减图

Fig. 3 Decay diagram of residual magnetism voltage of circulating pump motor

为验证合闸逻辑的可行性，搭建了RTDS模型，切换过程是先跳开QF₂和QF₃开关，然后再合QF₄开关，研究残压合闸方式在不同合闸角度

及不同频率情况下冲击电流的变化特征,残压定值取 $30\%U_N^{[4]}$ 。仿真得到合闸冲击电流结果见表2。

表2 残压合闸方式下合闸冲击电流

Tab. 2 Closing impulse current in residual voltage closing mode

初始频率 /Hz	冲击电流 (pu)				
	40°	60°	100°	140°	180°
40	5.5	6.5	10.2	12.8	15.3
30	6.0	7.2	11.0	14.8	15.2
25	6.4	8.2	12.9	15.6	16.8
20	7.0	8.5	13.5	17.2	17.8

电动机的过电流产生大的电磁力容易使电动机定子端部线圈发生变形,损害绝缘结构,为保护电动机的安全,现场电动机电流速断保护定值一般为7.5~8倍电动机额定电流值^[5-6]。从表2数据可知,残压合闸在低频段及相位差大于60°时,冲击电流较大,切换失败风险较高。一般情况下由于开关快速性不足,不能在最有利时刻实现快速切换,也可考虑使用同期切换,当快速切换和同期切换均未成功实现时,可采用残压切换方式,此外还需考虑开关的动作时间^[7]。故结合现场装置实际配置及工艺系统时间要求,决定采用残压切换,并在残压低于 $5\%U_N$ 时旁路开关QF₄合闸,以提高变频向工频旁路运行切换的可靠性。

当循泵由工频旁路向变频运行切换时,TMEIC MVG2型变频器采用无传感器矢量控制技术,具备对惰转中的电动机进行“飞车起动”的功能,不管电动机的实际转速是多少,都可以通过变频器直接带载运行。无速度传感器技术利用获取的检测量(如定子电压和电流等),通过电流模型法或者电压模型法计算出磁链和坐标转角及转速,输出和转子速度(频率)相同的频率,电源对旋转中的电动机实施再起,提高了感应电动机控制系统的性能和可靠性^[8]。若电动机由旁路运行向变频带载运行切换失败,可通过延时起动“回切”功能,待长延时条件满足后重新合闸旁路开关带载,保证循泵“回切”至工频运行模式时电动机的安全。

2.2.2 水力瞬变流分析

在切换过程中,由于突然停泵,导致整个

循环水系统丧失动力,引起循环水系统管道内压力快速下降,在流道的局部最高点(如凝汽器循环水侧出口顶部钛管位置)可能产生严重的负压区。从理论上讲,当凝汽器出口顶部钛管位置的循环水温度高于该处压力所对应的饱和温度时,管道内的水体会发生汽化,使钛管内的水柱不连续,长时间保持在该状态,循环水可能出现断流。一旦循泵在另一种运行模式下重新启动,压力升高时,汽化断流形成的大量汽泡溃灭,可能发生“非常水锤”而破坏管道和设备^[9]。故循泵两种运行模式之间的切换时间越短越好,最好在循环水未发生大面积汽化断流前完成切换过程,且不能出现严重的冷却水流量衰减现象。

瞬变流计算需考虑外海极端水位的情况下,最大流量运行时断电停泵输水系统水道的水动力反应;还需考虑(对应冬季小流量运行)外海极端低水位的情况下,最小流量时断电停泵水道系统可能出现的最低压力^[10]。根据该电站系统及设备参数进行了直流循环水系统水力瞬变流计算研究及仿真,将几种极端情况作为边界条件进行水力模型计算,结果见表3。根据仿真结果可知,三种极端工况下循泵运行模式切换在循环水整个流道的高点凝汽器处的最低压力为 -0.088 MPa ,该压力下对应的汽化饱和温度为 $49.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,而机组设计时循环水最高温度及温升分别为 $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $7.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,凝汽器循环水出水温度最高为 $40.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,该温度距离凝汽器循环水最低压力下所对应的汽化饱和温度 $49.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有足够的裕量而不致于汽化,整个系统不出现低于汽化压力的严重负压;同时三种极端工况下循泵运行模式切换时,循环水整个流道输水管道处最高压力为 0.370 MPa ,低于系统管道设计压力 0.4 MPa ,未发生超压,可以安全过渡;超过5 s时间,根据核电站循泵系统当前配置,循泵应跳闸并开启凝汽器循环水虹吸破坏阀,使循泵系统安全停运。

现场实测了循泵电动机断电后循环水流量衰减趋势,如图4所示。

表 3 极端情况下瞬变流计算结果
Tab. 3 Calculation results for transient flow in extreme cases

工况简介		百年一遇低潮位（-3.63 m） 小流量 32.8 Hz 断电停泵 5 s 内重新启动	百年一遇低潮位（-3.63 m） 大流量 50 Hz 断电停泵 5 s 内重新启动	百年一遇高潮（3.98 m） 大流量 50 Hz 断电停泵 5 s 内重新启动
恒定流	单泵流量 /（m ³ /h）	62 100	103 950	103 950
	凝汽器出口压力 P/MPa	- 0.005	- 0.004	0.002
瞬变流	是否倒流	否	否	否
	循环水泵 出口最大水锤压力 P/ 发生时间 T/（MPa/s）	0.157/7.72	0.237/11.13	0.280/7.62
	最大倒转转速 n/ 发生时间 T/（r/min）/s	57.27/5.02	50.87/5.00	59.43/5.02
	是否倒流	否	否	否
凝汽器	进口最大压力和最低压力 P/MPa	0.060/ - 0.027	0.256/ - 0.024	0.139/0.041
	出口最大压力和最低压力 P/ MPa	- 0.003/ - 0.088	0.171/ - 0.085	0.052/ - 0.045
输水管道	最高压力 P/ 发生时间 T/（MPa/s）	0.186/7.54	0.370/10.95	0.2718/9.47
	最低压力 P/ 及发生时间 T/（MPa/s）	0.200/2.58	0.008/2,54	0.080/1.73
排水管道	最高压力 P/ 及发生时间 T/（MPa/s）	0.126/7.65	0.220/11.09	0.179/7.46
	最低压力 P/ 及发生时间 T/（MPa/s）	- 0.034/2.34	- 0.044/2.39	0.015/1.48
		可以安全过渡	可安全过渡	可以安全过渡
说明		1. 表中循环水泵倒转转速：数值为正是设备正转，数值为负为设备反转； 2. 凝汽器及管道设计压力为 0.4 MPa（相对压力）。		

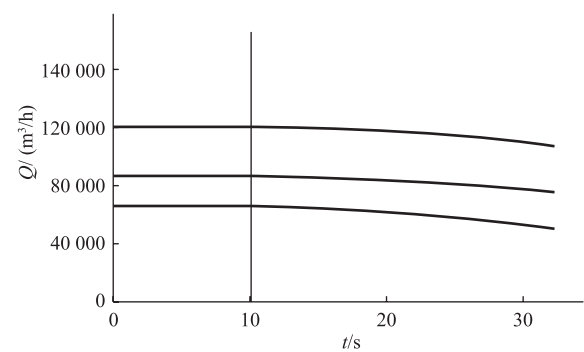


图 4 循环水流量衰减图
Fig. 4 Attenuation diagram of circulating water flow

当循泵电动机分别在50 Hz、40 Hz及32.8Hz工况下停运时，循环水流量在5 s内无衰减，10 s后流量衰减约5%。根据仿真结果，循泵变频、工频两种运行模式之间的电源切换在5 s内完成，保证了循泵电源切换及加载过程中的最低循环水流量对工艺系统安全运行无明显影响，为后续真型试验奠定了基础。

2.2.3 工艺保护分析

在循泵工频及变频切换过程中，上游断路器QF₁一直保持合闸状态（代表循泵运行信号），在此期间辅助油泵及高压油泵无法正常自动启动，但循泵在实际切换过程中存在断电停运、转速下降和再重新启动升速三个阶段，循泵辅助油泵及高压油泵不起动，存在转动部件和静止部件碰磨而导致重大设备损坏的风险，故需在手动切换起动前，将辅助油泵及高压油泵起动作为必要条件；在变频器重故障瞬态工况下，起动切换与油泵起动同时触发，保证循泵安全切换。

考虑到切换失败或切换过程中循环水压力降低，辅助冷却水系统母管压力同步下降，影响核电厂常规岛辅助冷却水的正常供应，故手动切换前，须确认另一台不切换运行模式的循泵正常运行，且向辅助冷却水系统正常供水。当前须切换工作模式的循泵至对应辅助冷却水供水电动阀已

关闭再启动切换, 保证切换过程中循环水流量变化不影响辅助冷却水系统的正常运行, 待切换结束后再将该电动阀门打开。

2.2.4 电气保护分析

为了满足运行过程中可能出现的变频和工频运行模式的不同保护需求, 如图5所示, 上游开关柜 QF_1 中配置了变压器保护测控装置RET615和电动机保护装置REM615, 保护功能可通过 QF_4 开关辅助触点变位进行投退。当循泵采用变频运行模式供电时, 变压器保护测控装置RET615投入过电流保护, 电动机保护装置REM615投入接地保护, 并闭锁其他保护, 实现对开关 QF_1 至变频器进线端电缆的保护。变频器自带保护, 实现变频器自身过载、过热等异常情况和电动机过载、短路、接地、过电压和欠电压等异常情况的保护, 从而实现变频供电电气系统的整体保护。当循泵通过工频旁路 QF_4 供电时, 上游开关柜 QF_1 投入RET615差动保护和REM615电动机保护, 包括过热保护、接地保护、速断保护和负序保护等, 实现对循泵电动机的全面保护。

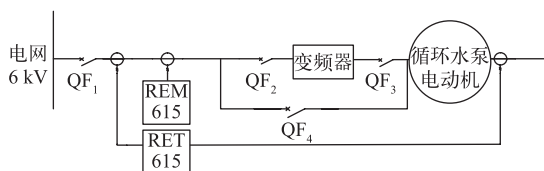


图5 循泵电动机保护示意图

Fig. 5 Schematic diagram of circulating pump motor protection

3 循泵变频工频切换方案确定

3.1 切换原则

通过对循泵两种运行模式之间的切换进行可靠性分析, 确定切换过程应遵循原则:

1) 循泵运行模式间的手动切换在50 Hz大流量工况下进行, 且电源切换时间控制在5 s内完成。

2) 循泵变频运行切换为工频运行过程中, 残压切换的条件为电动机残压幅值低于 $5\%U_N$, 同时相关电气保护同步切换。

3) 切换过程中须保证其他工艺系统正常运

行(如凝汽器真空、冷却水温度、循泵润滑油压及高压油压等), 故循环水流量不应低于循泵低频运行时所对应的流量, 并通过DCS逻辑配合实现系统切换的安全过渡。

4) 机组一台循泵两种运行模式间的手动切换, 均在另一台循泵正常运行情况下进行, 选择潮位较高的时机进行切换。

3.2 方案制定

对于循泵变频运行向工频运行切换, 考虑变频器故障自动切换及DCS手动切换两种工况: 若变频器发生重故障, 立即发出断开变频器进出线开关 QF_2 和 QF_3 指令, 启动循泵大辅助油泵和高压油泵指令, 上述两个断路器分闸到位且当满足延时条件时, 切换至工频旁路 QF_4 运行, 完成切换后, 自动停运油泵; 若手动切换, 须判断工艺系统是否满足手动切换条件, 条件满足后人工给出变频切工频指令, 关闭相应辅助冷却水取水支管上的电动蝶阀, 并启动辅助油泵和高压油泵, 待收到阀门及油泵动作反馈后, 分开变频器进出线开关 QF_2 和 QF_3 , 满足延时条件后循泵切换至工频旁路 QF_4 运行, 完成切换后, 自动停运油泵。

对于循泵工频运行向变频运行切换, 考虑工频切变频时切换失败则回切至工频旁路运行方案。当工艺系统满足手动切换条件时, 人工给出工频切变频指令, 关闭相应辅助冷却水取水支管上的电动蝶阀, 并启动辅助油泵和高压油泵。待收到阀门及油泵动作反馈后, 分开旁路开关 QF_4 , 满足延时条件后先后合上进出线开关 QF_2 和 QF_3 , 循泵切换至变频运行。若规定时间内未切换至变频运行模式, 检测到进出线开关 QF_2 和 QF_3 分闸后, 再延时重新合上旁路开关 QF_4 带载。

变频循泵两种运行模式之间的切换, 在安全切换时间内, 如果未完成切换或者切换不成功, 则应自动停止切换并断分 QF_1 , 将循泵安全停运, 以免因切换不成功造成循泵反转、循环水系统出现水锤等情况发生, 导致设备损坏, 相关切换逻辑流程图如图6所示。

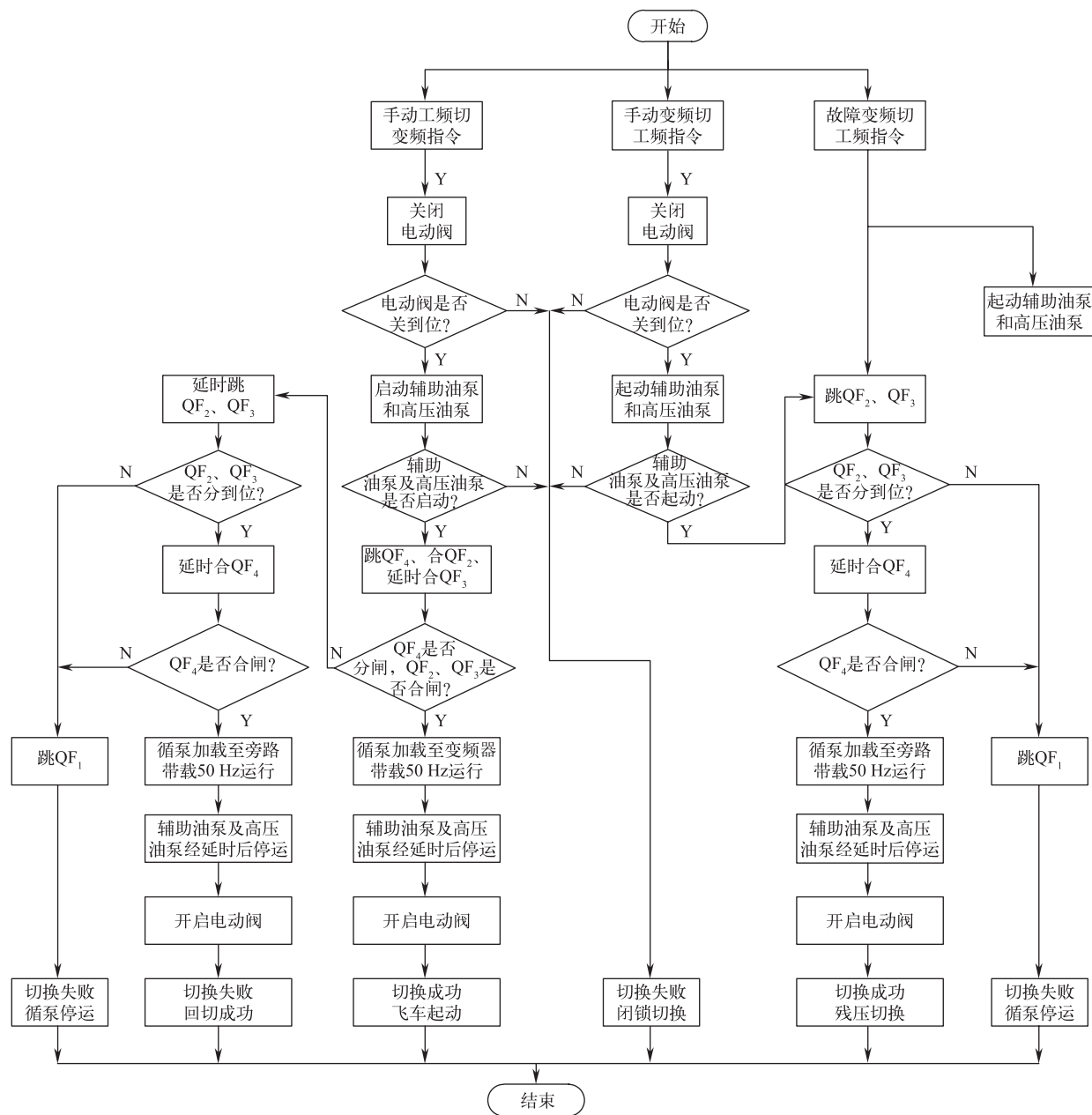


图6 循环水泵变频工频切换逻辑图

Fig. 6 Logic diagram for frequency conversion and power frequency switching of circulating water pump

4 切换技术应用情况

4.1 切换时电气波形

循泵由变频运行向工频旁路切换时,由于电动机存在剩磁电压,合闸后须保证电动机起动电流在上游开关 QF_1 的保护范围内,且对电动机无明显冲击。根据实际切换试验过程电流录波,切换成功后电动机起动电流为 $6I_e$,与电动机正常起

动时起动电流水平基本一致,故此切换工况下电流与上游 QF_1 的电流保护满足配合关系。

循泵由工频旁路运行向变频运行切换时,变频器通过检测电动机剩磁电压计算电动机转速,并通过“飞车启动”功能将惰转中的电动机重新带载,试验时变频器起动时刻电动机转速约为额定转速的65%,电动机剩磁电压约为额定电压的50%,变频器根据当前电动机转速进行带载,如

图7所示, 切换前开关侧 QF_1 电流及电动机中性点电流幅值及相位一致。当旁路开关 QF_4 断开后, 电流立即衰减至零, 在变频器进线开关 QF_2 合闸瞬间, 给变频器移相变压器充电。在变频器预充电回路作用下, 开关侧冲击电流比较小, 且快速恢复正常。在变频器出线开关 QF_3 合闸后, 变频器带电动机起动, 此过程也未产生任何冲击电流。后以变频器的设定斜率加载至额定电流运行, 用时约25 s, 整个切换过程无论开关侧还是中性点侧电流均在额定电流以下。

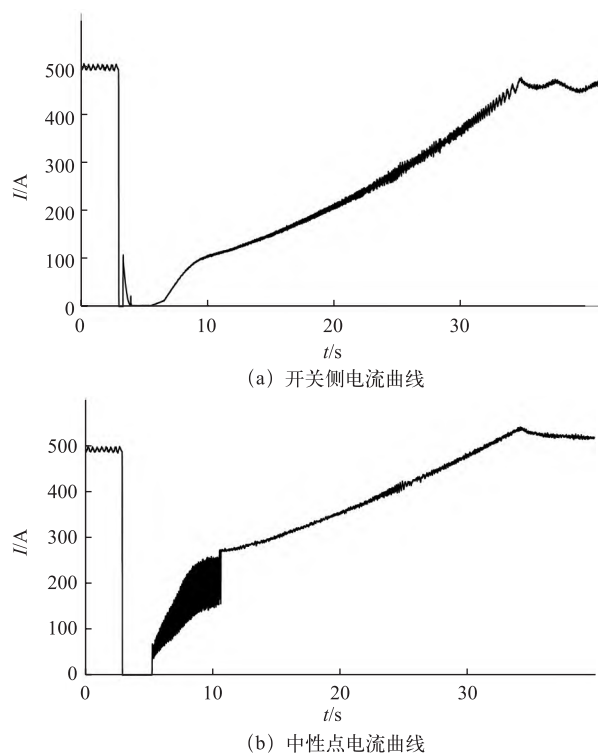


图7 变频切换至工频运行电流波形图

Fig. 7 Frequency conversion to power frequency operation current waveform diagram

4.2 切换时凝汽器压力曲线

循泵运行模式切换时的监测结果表明, 在切换过程中, 凝汽器水室进出口压力产生了一定的变动, 如图8所示。图8中上方曲线为凝汽器水室进口压力变化情况, 下方曲线为凝汽器水室出口压力变化情况。

循泵由变频运行向工频旁路运行切换时, 凝汽器进出口压力均产生一定波动, 持续时间12 s

后恢复至正常压力; 循泵由工频旁路运行向变频运行切换时, 由于变频器按照固定的速度进行加载, 故压力恢复的时间较长, 持续时间约25 s后恢复至切换前水平。在电动机失电后到再次得电前, 系统压力处于最低位, 为凝汽器出口压力0.027 MPa, 两次切换系统最低压力都在设计允许范围内不会发生汽化, 切换过程中现场设备管道也未发现水锤现象, 仿真结论及现场试验结果均证实了该时间内系统可安全过渡。

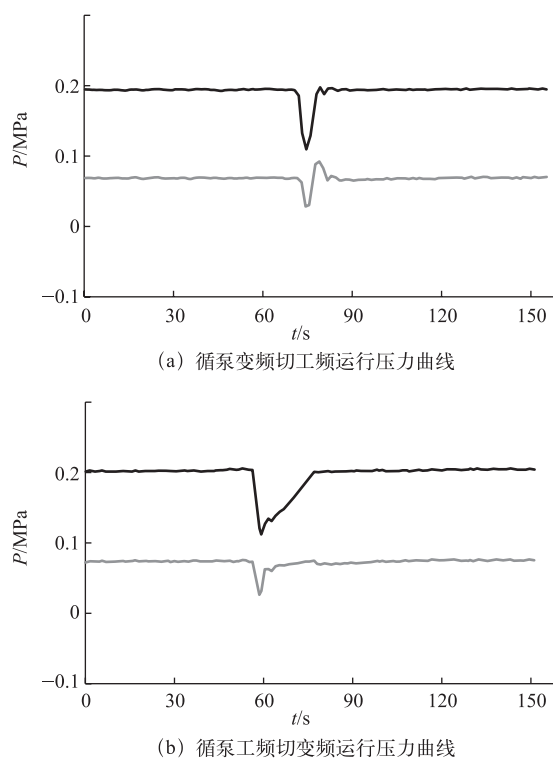


图8 凝汽器水室进出口压力曲线图

Fig. 8 Pressure curve diagram of inlet and outlet of condenser water chamber

4.3 切换时工艺流量曲线

切换过程中循环水流量会有一定波动, 如图9所示。在进行循泵电动机变频向工频切换过程中, 电动机旁路工频启动时间接近5 s, 在10 s内电动机转速可恢复到切换前运行状态, 此过程循环水流量衰减量极小, 且短时恢复正常。循泵电动机工频向变频切换过程中, 流量产生衰减, 持续时间约30 s, 最低流量衰减约15%, 但仍大于循泵在中频运行时的流量水平, 对凝汽器冷却无

影响。根据试验验证及结果分析,切换过程对机组正常运行期间三回路冷源供应无影响,验证了切换方案的可行性。

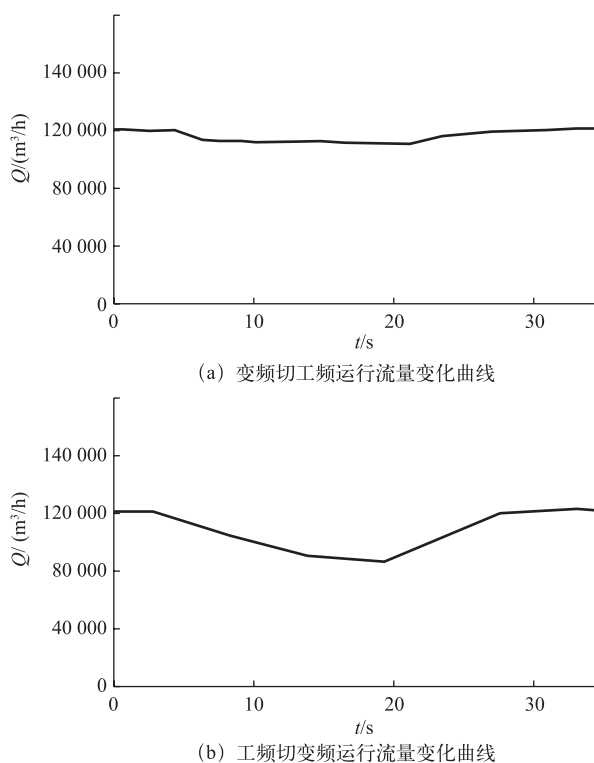


图9 循环水泵工频及变频切换流量趋势图

Fig. 9 Trend chart of power frequency and frequency conversion switching flow rate of circulating water pump

5 结束语

某核电循环水系统基于DCS平台实现了变频循环泵两种工作模式之间的在线切换,为循环泵采用变频技术而额外增加的故障停运隐患提供了解决方案。该技术的研究及应用,提高了机组运行的可靠性、灵活性及经济性,有效解决了现有核电站循环泵变频系统存在的问题,为机组安全稳定运行提供了有力的保障。

参考文献

- [1] 马宏忠,臧芳,张利民.异步电动机失电残余电压的防范与应用[J].大电机技术,2005(2):

17-20.

- [2] 曹祯,董桂成,朱庆海,等.快速切换装置在石化行业应用存在的问题及解决方案[J].电气技术,2021,22(6):106-113.
- [3] 电厂厂用电源快速切换装置通用技术条件:DL/T 1073—2007[S].
- [4] 李杰,李华奎.一种适用于变频器电源切换装置的合闸方法[J].电气技术,2022,23(2):105-108.
- [5] 高春如.大型发电机组继电保护整定计算与运行技术[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [6] 高吉增,杨玉磊,崔学深.感应电动机失电残压的研究及其对重合过程的影响[J].电力系统保护与控制,2009,37(4):45-48.
- [7] 崔学深,张自力,李和明,等.感应电机电源切换中残压和电压差的研究及最优切换策略[J].电工技术学报,2015,30(2):162-171.
- [8] 刘栋良,郑谢辉,崔丽丽.异步电机无速度传感器控制系统中磁场跟踪控制器设计[J].电工技术学报,2010,25(5):82-87.
- [9] 郑大琼,沈康,王念慎.“非常水锤”的发生条件及预防措施[J].中国电力,2002,35(9):17-20.
- [10] 直流循环水系统水力瞬变流计算研究[Z].中国核电工程有限公司,2018.

作者简介

傅建军(1972—),男,高级技师,享受国务院特殊津贴专家,从事核电厂工艺系统运行与控制研究及调试工作。

王东阳(1994—),男,本科,工程师,从事核电厂继电保护检修工作。

王玉晶(1982—),男,本科,高级工程师,从事核电厂电气检修及管理工作。

杨锡宏(1994—),男,本科,工程师,从事核电厂继电保护检修工作。

(收稿日期:2023-05-28)