

核电厂核岛不间断电源系统接地故障分析

于 艇, 刘 晨, 叶育林

(深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 核电厂核岛不间断电源系统在厂用电故障时, 向需要不间断供电的负荷持续供电, 对核电厂的安全运行具有重要的意义。能动型三代核电厂因普遍采用380 V电动隔离阀作为安全级隔离装置, 需配置380 V交流不间断电源系统。核电厂核岛380 V不间断电源系统采用TN-S接地系统, 但因其接地形式与标准的TN-S系统存在差异, 需对其接地故障电流的计算方法进行分析研究, 得出不间断电源系统单相接地故障电流计算方法, 并进行对应的计算和校验。同时, 因其接地方式的特殊性, 不间断电源系统在旁路检修时, 可能存在接地点失去的问题, 需根据不间断电源系统的运行方式和接线方式, 采取改进措施。

关键词: 不间断电源; 单相接地; 故障电流计算

Ground fault analysis of uninterrupted power supply system for nuclear island of nuclear power plant

YU Ting, LIU Chen, YE Yulin

(China Nuclear Power Design Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: The uninterrupted power supply system in the nuclear island of nuclear power plant provides continuous power to the load requiring uninterruptable power supply in the event of plant power failure, which is of great significance to the safe operation of the nuclear power plant. Because the 380 V electric isolating valves are widely used as safety isolating devices in the active nuclear power plant of the third generation, 380 VA C uninterrupted power supply system is required. TN-S system is used in the 380 V uninterrupted power supply system, while the location of the ground point of the system is special. Due to the difference to the standard TN-S system, the calculation method of ground fault current should be analyzed and studied, in order to obtain the calculation method of single-phase grounding fault current of the uninterrupted power supply system. And the corresponding calculation and verification should be carried out. Meanwhile, due to the particularity of its grounding mode, the system may lose its ground point in the bypass maintenance of the system, and the improvement measures should be taken according to the operation and wiring mode.

Key words: uninterrupted power supply; single-phase grounding fault; fault current calculation

0 引言

不间断电源系统(UPS)的主要功能是外部电源故障情况下对负载不间断地提供交流电源。核电厂核岛不间断电源系统在厂用电故障时, 向需要不间断供电的负荷持续供电, 对核电厂

的安全运行具有重要的意义。二代核电机组中, 核岛不间断电源系统的主要负荷为仪表控制类设备, 一般配置220 V交流不间断电源系统。能动型三代核电厂因普遍采用380 V电动隔离阀作为安全级隔离装置, 需配置380 V交流不间断电源

系统。

380 V交流不间断电源系统的主电源来自上游220 V直流系统，通过逆变器变流，连接至不间断电源母线。在厂用电故障时，直流系统的蓄电池放电，通过逆变器的电源转换，向负荷持续供电。同时，不间断电源系统通过静态切换开关与旁路电源相连，在逆变器故障或直流系统电源失去情况下，可不间断地切换至旁路供电。核岛380 V交流不间断电源系统的电源结构如图1所示。

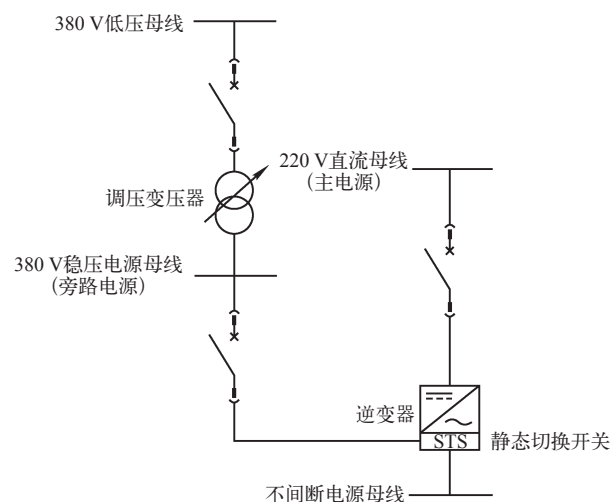


图1 不间断电源系统接线图

Fig. 1 Wiring diagram of the uninterrupted power supply

核岛380 V交流不间断电源系统的设备特性和接地方式与普通低压配电系统存在差异，本文将结合核岛380 V不间断电源系统的设备特性和接地方式，对系统单相接地故障电流的计算方法进行说明，并针对典型回路进行单相接地故障电流的计算和分析。同时，结合系统的接线方式，对目前核岛380 V不间断电源系统存在的问题进行分析，并给出解决措施。

1 接地方式

GB 50065—2011中定义了三种低压接地系统，分别为TT、TN和IT系统^[1]，其中TN系统又包含TN-S、TN-C和TN-C-S三种分系统。

在TN-S系统中，负载不对称或存在非线性负载时，仅N线有电流通过，PE线无电流通过，PE线无电压，不会引起设备机壳带电。同

时TN-S系统在发生单相接地故障时，故障电流较大，对于保护装置的选择和故障的切除更为有利。因此TN-S系统是较为理想的低压配电系统接地方式^[1]。

核岛不间断电源系统的简化示意图如图2所示，接地方式选用TN-S系统。相较于典型TN-S类型380 V低压配电系统，核岛不间断电源系统的N线连接方式和接地点的位置存在差异。

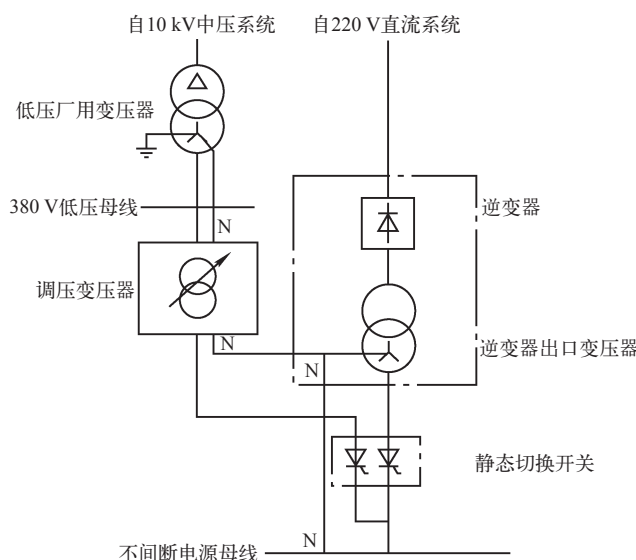


图2 不间断电源系统接地简化接线示意图

Fig. 2 Simplified wiring diagram of the uninterrupted power supply

从图2中可以看出，不间断电源系统的主电源、旁路电源及母线的N线连通。其中，调压变压器无隔离功能，其输入侧和输出侧的N线连通。因此，核岛直流及不间断电源系统无论在主电源供电模式还是旁路电源供电模式下，系统的N线均与旁路连接，且接地点位于旁路调压变压器上游380 V低压配电系统变压器低压侧中性点处，与旁路上游的380 V低压配电系统共用接地点。该接线方式使系统在单相接地故障时，故障电流的流向与普通380 V低压配电系统存在差异，这部分内容将在下文中详述。

2 接地故障电流计算

2.1 相保阻抗

在低压网络中发生不对称短路时，由于短路

点离发电机较远,因此可以认为所有元件的负序阻抗等于正序阻抗,即等于相阻抗。

TN接地系统的低压配电网络零序阻抗等于相线的零序阻抗与3倍保护线(即PE、PEN线)的零序阻抗之和,即^[3]

$$\begin{aligned} Z_{(0)} &= Z_{(0),ph} + 3Z_{(0),p} \\ R_{(0)} &= R_{(0),ph} + 3R_{(0),p} \\ X_{(0)} &= X_{(0),ph} + 3X_{(0),p} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $Z_{(0)}$ 、 $R_{(0)}$ 和 $X_{(0)}$ 为低压网络的零序阻抗、零序电阻和零序电抗; $Z_{(0),ph}$ 、 $R_{(0),ph}$ 和 $X_{(0),ph}$ 为相线的零序阻抗、零序电阻和零序电抗; $Z_{(0),p}$ 、 $R_{(0),p}$ 和 $X_{(0),p}$ 为保护线的零序阻抗、零序电阻和零序电抗。

TN接地系统低压网络的相保阻抗与各序阻抗的关系为

$$\begin{aligned} Z_{ph} &= \frac{Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}}{3} \\ R_{ph} &= \frac{R_{(1)} + R_{(2)} + R_{(0)}}{3} = \frac{2R_{(1)} + R_{(0)}}{3} \\ X_{ph} &= \frac{X_{(1)} + X_{(2)} + X_{(0)}}{3} = \frac{2X_{(1)} + X_{(0)}}{3} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, Z_{ph} 、 R_{ph} 和 X_{ph} 为低压网络的相保阻抗、相保电阻和相保电抗。

2.2 逆变器的短路特性

逆变器通过IGBT逆变电路,将直流电源转换为380 V交流电源,并通过一台变压器输出。

逆变器以出口电压作为控制目标,在正常运行期间为恒压源。在系统出现短路故障时,在逆变器反馈控制作用下,若不采取限流和短路保护措施,当输出电流达到一定程度时,开关管就会烧毁。因此逆变器需设置限流电路。当下游短路时,逆变器将把输出电流限制在某个限流值,若延时一段时间(用于保护动作)后故障仍未切除,逆变器将保护停机。

单相接地故障因故障点的差异,故障电流范围较宽。若发生单相接地故障后,逆变器的总输出电流并未超过限流值,则逆变器仍为理想电压源,可认为其内阻为0;若故障后,逆变器的总输出电流超过逆变器限流值,因逆变器的快速限

流作用,可近似地认为逆变器为内阻抗无穷大的纯交流电流源,其输出电流为逆变器限流值^[5],接地故障电流为限流值减去正常回路的电流值。

2.3 线路的相保阻抗

不间断电源系统电缆线路阻抗计算方法与典型380 V低压配电系统计算方法相同。电缆线路的相保阻抗为

$$\begin{aligned} R_{ph,l} &= \frac{R_{(1)} + R_{(2)} + R_{(0)}}{3} \\ &= \frac{R_{(1)} + R_{(2)} + R_{(0),ph} + 3R_{(0),p}}{3} = R_{ph} + R_p \\ X_{ph,l} &= \frac{X_{(1)} + X_{(2)} + X_{(0)}}{3} \\ &= \frac{X_{(1)} + X_{(2)} + X_{(0),ph} + 3X_{(0),p}}{3} \\ &= \frac{1}{3}(X_{(1)} + X_{(2)} + X_{(0),ph}) + X_{(0),p} \\ Z_{ph,l} &= \sqrt{R_{ph,l}^2 + X_{ph,l}^2} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $R_{ph,l}$ 为电缆的相保电阻; $X_{ph,l}$ 为电缆的相保电抗; $Z_{ph,l}$ 为电缆的相保阻抗; $R_{(1)}$ 、 $X_{(1)}$ 为电缆的正序电阻和正序电抗; $R_{(2)}$ 、 $X_{(2)}$ 为电缆的负序电阻和负序电抗; $R_{(0)}$ 、 $X_{(0)}$ 为电缆的零序电阻和零序电抗; $R_{(0),ph}$ 、 $X_{(0),ph}$ 为电缆的相线零序电阻和相线零序电抗; $R_{(0),p}$ 、 $X_{(0),p}$ 为电缆的保护线零序电阻和保护线零序电抗。

2.4 旁路N线回路的阻抗

对于典型TN-S系统,母线或负荷回路发生接地故障后,故障电流经PE线回流至变压器中性点。核岛不间断电源系统的接地点位于上游低压厂用变压器,在逆变器供电情况下,在出现接地故障后,故障电流经PE线流至上游低压厂用变压器中性点,并通过不间断电源旁路的N线回流至逆变器出口变压器的中性点,如图3所示。因此,在逆变器主电源供电情况下,单相接地故障的相保阻抗计算时,需考虑旁路上游低压厂用变压器至逆变器出口变压器之间的N线回路的相保阻抗。在旁路N线回路相保阻抗计算时,旁路回路中的N线按照故障回路的相线考虑。

在不间断电源系统旁路运行时,不间断电源

系统类似于380 V交流电源系统的次盘系统，故障电流经PE线回流至上游低压系统的变压器中性点。如图4所示，不存在旁路N线阻抗的问题。

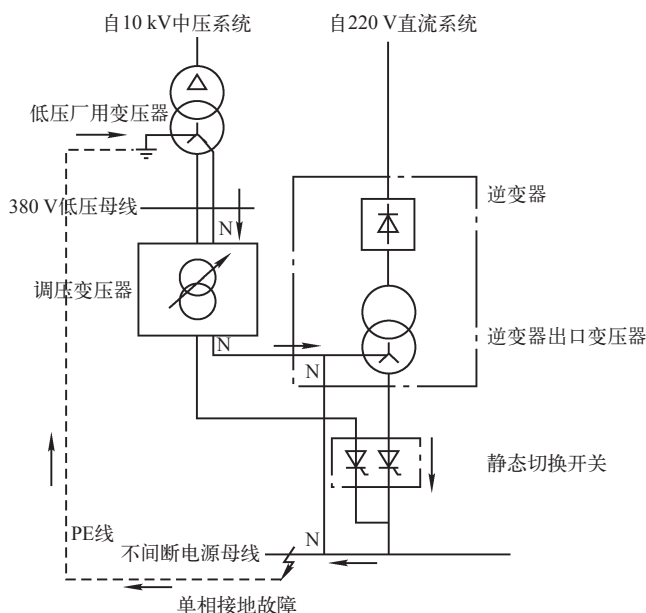


图3 逆变器输出时单相接地故障电流流向示意图

Fig. 3 Schematic diagram of current flow of single phase grounding fault under inverter supply

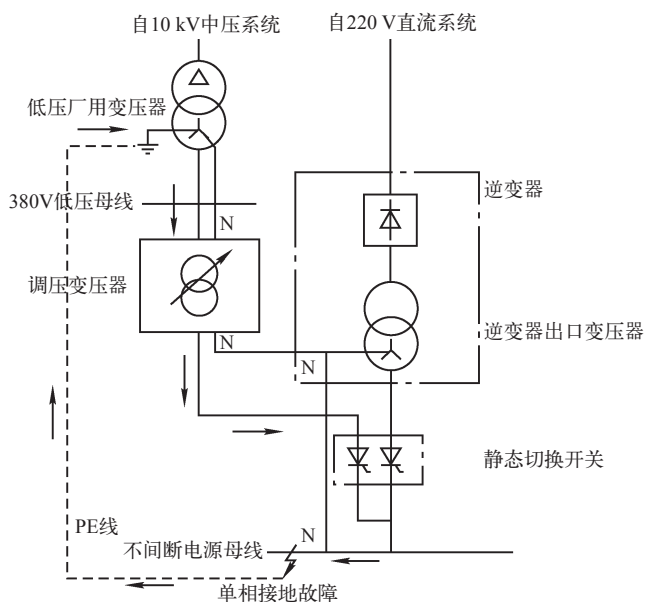


图4 旁路输出时单相接地故障电流流向示意图

Fig. 4 Schematic diagram of current flow of single phase grounding fault under bypass supply

2.5 逆变器供电状态的单相接地故障电流计算

结合2.1节~2.4节的分析，在逆变器供电状

态下，核岛不间断电源系统单相接地故障的相保阻抗为

$$\begin{aligned} R_{\text{php}} &= \frac{R_{(1)} + R_{(2)} + R_{(0)}}{3} \\ &= R_{\text{php.s}} + R_{\text{php.T}} + R_{\text{php.m}} + R_{\text{php.L}} + R_{\text{php.N}} \\ X_{\text{php}} &= \frac{X_{(1)} + X_{(2)} + X_{(0)}}{3} \\ &= X_{\text{php.s}} + X_{\text{php.T}} + X_{\text{php.m}} + X_{\text{php.L}} + X_{\text{php.N}} \\ Z_{\text{php}} &= \sqrt{R_{\text{php}}^2 + X_{\text{php}}^2} \end{aligned} \quad (4)$$

式中， $R_{\text{php.s}}$ 、 $X_{\text{php.s}}$ 为变压器高压侧系统的相保电阻、电抗，本文计算为0； $R_{\text{php.T}}$ 、 $X_{\text{php.T}}$ 为变压器的相保电阻、电抗，本文计算为0； $R_{\text{php.m}}$ 、 $X_{\text{php.m}}$ 为母线电阻、电抗，mΩ； $R_{\text{php.L}}$ 、 $X_{\text{php.L}}$ 为线路的相保电阻、电抗，mΩ； $R_{\text{php.N}}$ 、 $X_{\text{php.N}}$ 为旁路N线回路的相保电阻、电抗，mΩ。

不间断电源系统的单相接地故障电流计算值为

$$I_k'' = \frac{220}{Z_{\text{php}}} \quad (5)$$

如2.2节所述，若 $I_{k1}'' < I_m - I_L$ ，

$$I_{k1}'' = I_k'' \quad (6)$$

若 $I_{k1}'' \geq I_m - I_L$ ，

$$I_{k1}'' = I_m - I_L \quad (7)$$

式中， I_k'' 为相接地故障电流计算值； I_{k1}'' 为相接地故障电流调整值； I_m 为逆变器限流值； I_L 为常回路电流。

因正常情况下，不间断电源的长期运行负荷电流占额定输出电流的比例较低（参考电站约1/4），在单相接地故障引起逆变器输出功率达到限流值时，故障回路的阻抗值远低于正常回路阻抗值的等效值。此时，逆变器为近似电流源，故障回路和正常回路的电流按照导纳的比例分配。故障回路的导纳远大于正常回路的导纳，故障回路的电流将远大于正常回路的电流。因此，计算时，可近似认为正常回路电流为0，故障电流近似为逆变器限流值。

2.6 旁路供电状态的单相接地故障电流计算

如2.4节所述，不间断电源系统旁路运行

时，类似于380 V交流电源系统的次盘系统，其单相接地故障电流计算方法与逆变器供电的计算方法相比，差异包括以下几个方面。

- 1) 变压器高压侧系统的相保电阻、电抗 $R_{php.s}$ 、 $X_{php.s}$ 需根据电厂实际情况配置。
- 2) 变压器的相保电阻、电抗 $R_{php.T}$ 、 $X_{php.T}$ 需根据上游低压厂用变压器和旁路变压器的电阻、电抗进行配置。
- 3) 运行时，无旁路N线的电阻、电抗 $R_{php.N}$ 、 $X_{php.N}$ 。
- 4) 逆变器供电，不存在逆变器限流的影响。计算方法参照2.5节。

2.7 计算结果

本节以某核电项目的数据为例，对核岛不间断电源系统供电的典型回路进行了单相接地故障电流计算。

在逆变器供电情况下，计算过程数据和结果如表1所示。从表1中可以看出，母线接地故障和大截面电缆接地故障时，故障电流近似等于逆

变器输出限流值（参考项目中逆变器限流值为1.92 kA）。对于小截面、长距离电缆，末端接地故障时，故障电流低于逆变器的限流值，需根据计算结果对回路的保护进行校验。

在旁路供电情况下，对应回路的计算过程和结果如表2所示。其中，前端总阻抗包含了上游低压厂用变压器高压侧系统、低压厂用变压器、低压厂用变压器至不间断电源的各级线路、调压变压器以及中间配电盘母排的电阻和电抗。从结果可以看出，对于母线和大截面电缆回路的单相接地故障，因没有逆变器的限流作用，其故障电流大于逆变器供电的故障电流。对于小截面回路末端单相接地故障，其故障电流与逆变器故障时的故障电流接近。

目前旁路至下一级母线的断路器均选用N线带保护的4P断路器，需确保在逆变器供电情况下，旁路N线的接地故障电流回路中，各开关保护动作与故障电流的配合，避免不间断电源系统在逆变器供电时，下游接地故障情况下，旁路N

表 1 逆变器供电下典型回路接地故障电流计算结果

Tab. 1 Calculation results of grounding fault current of typical circuit under inverter supply

线路规格 (CU)	线路长度/m	线路相保阻抗/mΩ		母线相保阻抗/mΩ		旁路 N 线相保阻抗/mΩ		总计算阻抗/mΩ			故障电流/kA	
		$R_{php.L}$	$X_{php.L}$	$R_{php.m}$	$X_{php.m}$	$R_{php.N}$	$X_{php.N}$	R_{php}	X_{php}	Z_{php}	计算电流	调整后
母线	0	0	0	0.25	1.83	45.37	10.67	45.62	12.50	47.30	4.65	1.92
3*120	56	21.26	8.51	0.25	1.83	45.37	10.67	66.88	21.01	70.10	3.14	1.92
3*70	32	15.507 2	4.992	0.25	1.83	45.37	10.67	61.13	17.49	63.58	3.46	1.92
3*35	37	27.180 2	5.92	0.25	1.83	45.37	10.67	72.80	18.42	75.10	2.93	1.92
3*16	75	99.795	13.05	0.25	1.83	45.37	10.67	145.42	25.55	147.64	1.49	1.49
3*10	141	280.25	26.51	0.25	1.83	45.37	10.67	325.87	39.01	328.20	0.67	0.67
3*4	152	689.11	30.40	0.25	1.83	45.37	10.67	734.73	42.90	735.98	0.30	0.30
3*2.5	155	1 102.61	34.10	0.25	1.83	45.37	10.67	1 148.23	46.60	1 149.18	0.19	0.19

表 2 旁路供电下典型回路接地故障电流计算结果

Tab. 2 Calculation results of grounding fault current of typical circuit under bypass supply

线路规格 (CU)	线路长度/m	前端总阻抗/mΩ		线路相保阻抗/mΩ		母线相保阻抗/mΩ		总计算阻抗/mΩ			故障电流/kA
		$R_{php.Q}$	$X_{php.Q}$	$R_{php.L}$	$X_{php.L}$	$R_{php.m}$	$X_{php.m}$	R_{php}	X_{php}	Z_{php}	
母线	0	57.53	21.32	0.00	0	0.25	1.83	57.78	23.15	62.25	3.53
3*120	56	46.28	21.32	21.26	8.51	0.25	1.83	67.79	31.66	74.82	2.94
3*70	32	46.28	21.32	15.507 2	4.992	0.25	1.83	62.04	28.14	68.13	3.23
3*35	37	46.28	21.32	27.180 2	5.92	0.25	1.83	73.71	29.07	79.24	2.78
3*16	75	46.28	21.32	99.795	13.05	0.25	1.83	146.33	36.20	150.74	1.46
3*10	141	46.28	21.32	280.25	26.51	0.25	1.83	326.79	49.66	330.54	0.67
3*4	152	46.28	21.32	689.11	30.40	0.25	1.83	735.64	53.55	737.59	0.30
3*2.5	155	46.28	21.32	1102.61	34.10	0.25	1.83	1 149.14	57.25	1 150.57	0.19

线流过的故障电流使旁路回路中的开关误动作。

3 存在的问题及处理措施

3.1 存在的问题

在核电厂停堆大修期间，核岛不间断电源系统的逆变器回路和旁路将轮流检修。在旁路电源停盘维修期间，可能引起不间断电源失去接地点，成为N线配出的不接地系统。该种运行方式存在如下问题。

(1) 接地故障无法切除

在接地点断开后，不间断电源系统成为IT系统，此时若发生单相接地故障，因系统不接地，没有形成故障电流回路，不会产生故障电流。因系统按照TN-S系统设计，无绝缘监视装置，不会产生故障报警，无法发现故障。在接地点恢复后，形成故障电流回路，将产生故障电流，并将通过开关的保护动作切除故障。

(2) 产生较高的N线对地电压

接地点断开后，N线将产生一定的“零地电压”。正常情况下，“零地电压”不会对负荷或人身安全造成影响，当回路发生单相接地故障时，“零地电压”可达到220 V，并将随旁路的N线传递至旁路上游低压配电系统供电回路的N线出线端子，使已隔离的配电柜内出线位置带电，存在维修人员触电风险。

(3) 产生较高的相线对地电压

在不间断电源系统不接地运行期间，若发生单相接地故障，未接地的相线对地电压为380 V，高于TN-S模式下的220 V。超出了部分设备的相线对地电压限值，将使部分重要设备无法正常工作。

旁路检修情况下单相接地示意图如图5所示。

3.2 解决的措施

根据3.1节的分析，在不间断电源系统不接地运行期间，单相接地故障将无法发现和排除，且不接地运行时的单相接地故障将影响部分重要设备的正常运行，并产生一定的人身安全风险，因此，必须通过一定的改进措施，避免出现不间断

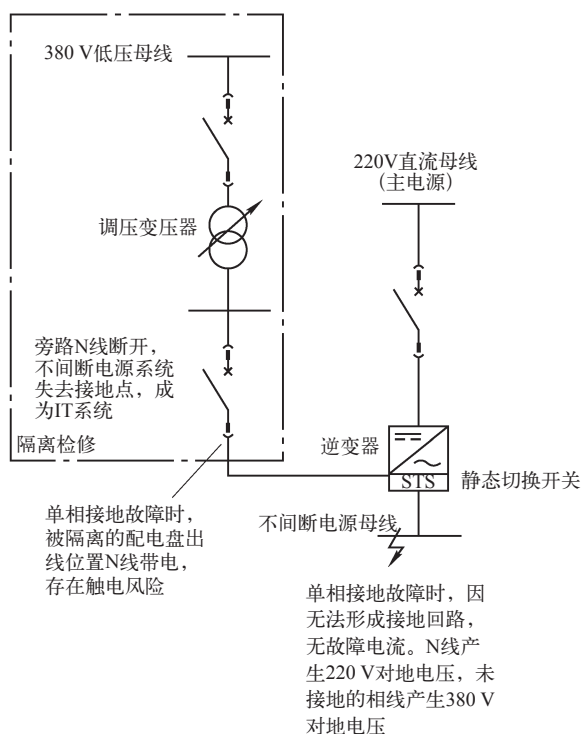


图 5 旁路检修情况下单相接地示意图

Fig. 5 Single phase grounding diagram under bypass maintenance

断电源不接地运行的情况。

可通过在不间断电源系统配电盘配置N线备用接地回路的方式,解决系统不接地运行的问题,如图6所示。正常运行期间,N线备用接地回路断开,不间断电源系统仍在旁路上游的低压配电系统变压器中性点处接地,确保系统单点接地运行;在旁路维修时,在不间断电源配电盘处通过备用接地开关手动将N线接地,确保不间断电源系统仍为单点接地的TN-S系统。为避免配电盘的N线接地回路误合闸造成系统两点接地,需通过相关规程规定旁路开关断开隔离后方能闭合N线接地开关。

除上述改进方案,也可在不间断电源系统旁路配置单独的隔离变压器,在不间断电源的配电盘处将N线单点接地,可使不间断电源系统成为独立的TN-S系统,接地方式和故障分析则可不受外部系统状态的影响。但该方案需要新增一台变压器,需要额外的布置空间,且增加了设备成本。

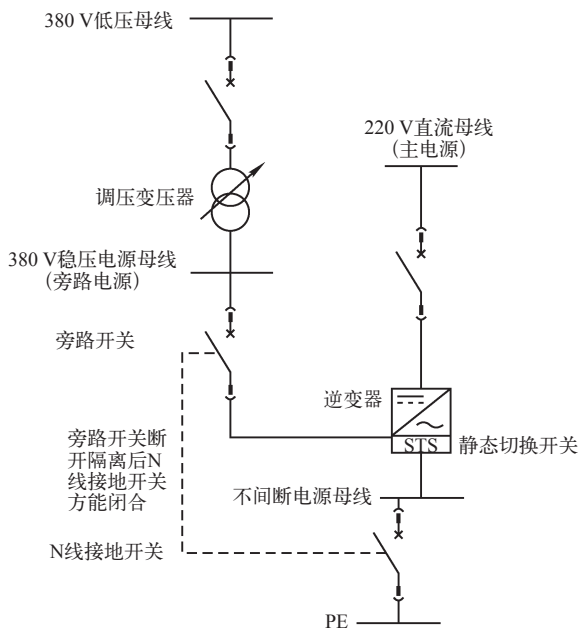


图6 配电盘改进示意图

Fig. 6 Improvement diagram of the switchboard

4 结束语

国内能动型三代核电厂首次使用380 V不间断电源系统作为核岛应急后备电源，因其接地方式与普通380 V低压配电系统存在差异，在正常运行和旁路检修的情况下，接地故障电流的流向和接地故障的影响均存在差异。在核岛不间断电源系统设计过程中，需充分考虑系统配置的特殊性，通过设计过程的适应性调整，确保分析过程的正确性，保证系统设计的安全性和可靠性。

参考文献

- [1] 国家标准委员会. 交流电气装置的接地设计规范: GB 50065—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [2] 国家标准委员会. 低压配电设计规范: GB 50054—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [3] 中国航空工业规划设计研究院. 工业与民用配电设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [4] 刘希禹. UPS的接地系统[J]. UPS应用, 2008(6): 25-29.
- [5] 杜公言, 曹炜. 含逆变器电源的电力系统短路电流计算[J]. 电气技术, 2015(9): 38-42.
- [6] 郑琼林, 郝荣泰, 王儒. IGBT逆变器短路保护试验与分析[J]. 机车电传动, 2001(3): 19-21.
- [7] 王林兵, 何湘宁, 张超. 逆变器输出限流技术研究[J]. 电力电子技术, 2006, 40(4): 65-67.

作者简介



于艇

于艇（1986—），男，硕士，工程师，主要从事核电厂电气二次设计工作。

（收稿日期：2020—07—16）**EA**