核电厂1E级UPS系统短路故障分析

陶 果[1]，曹影丽[2]

（1. 上海核工程研究设计院有限公司，上海 200233；2. 三门核电有限公司，浙江 三门 317100）

摘要：分析了核电站1E级UPS系统结构，研究了系统供电特性，建立了系统供电和短路电流分析模型，计算了线路故障情况下的故障电流和动作时间，分析了保护设备的有效性和选择性。

关键词：1E级；UPS系统；短路

Short-circuit fault analysis of nuclear power plant class-1E UPS system

TAO Guo[1], CAO Yingli[2]

(1. Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200233, China; 2. Sanmen Nuclear Power Co., Ltd., Sanmen 317100, China)

Abstract: System structure of nuclear power plant class-1E UPS system is analyzed. Based on power supply characteristics of UPS system, the model of calculating short-circuit current is built. Base on the model, the short-circuit current is calculated and the activate time of protection equipment is analyzed, and the effectiveness and selectivity of protection equipment is analyzed.

Key word: class-1E; UPS system; short-circuit

0 引言

在核电站中，1E级UPS系统用于给1E级仪控系统等重要负荷供电，以保证事故工况下相关1E级系统和设备能够可靠工作，执行所需的安全功能，确保核电站的安全。由于通常情况下，1E级UPS电源的配电盘需要通过不同回路给多个重要负荷供电，为了保证供电的可靠性，减少某一回路故障对其他供电回路的影响，需要准确分析系统的短路故障电流，合理选择回路的保护装置，确保保护的选择性，避免故障扩大。

1 UPS系统结构

核电站1E级UPS系统根据设计和功能要求可以有不同的结构，通常核电站同时需要有1E级直流电源和1E级UPS电源，且需要供电有较高的可靠性，因此采取的UPS结构一般为带旁路的可输出直流和交流UPS结构，典型的核电站1E级UPS系统结构如图1所示[1]。系统的主要设备由1E级逆变器、旁路电源及相关的1E级配电盘组成。其中旁路电源可以根据系统设计要求设计为直接引自相关的交流电源或者通过调压变压器供电。正常运行时，系统由1E级直流配电盘给逆变器供电，为设备提供可靠的电源。当系统处于自动模式时，若逆变器发生异常或者故障，会自动切换到旁路供电，而不会中断供电，以确保供电连续性。

由图1可以看出，逆变器的输出接至1E级UPS配电盘，再由该配电盘的馈线回路分别给相应的1E级负荷供电。

国家科技重大专项课题“CAP1400超大容量1E级阀控蓄电池自主化研制”（编号2017ZX06002009）

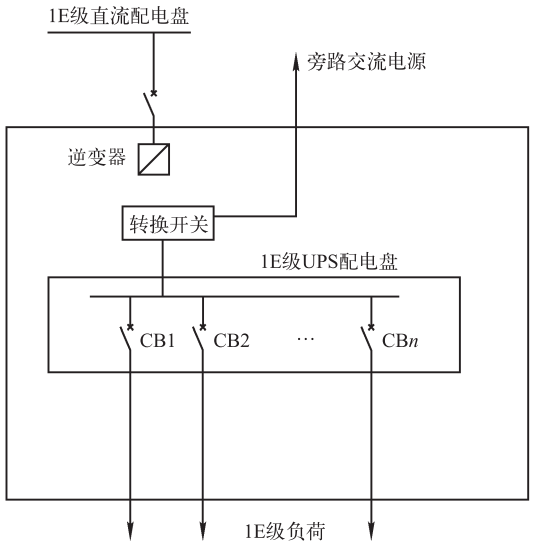

图 1　1E级UPS系统结构

Fig. 1 Structure of class-1E UPS system

通常情况下，逆变器具有一定的过载能力，能够在一定的时间内承受不同等级的过电流。当输出短路时，逆变器的限流设计特性会限制故障电流在200%额定电流一段时间后跳闸。当逆变器负荷的某一馈线回路发生短路故障时，需要保证馈线保护装置能够在逆变器跳闸前动作，确保保护的选择性，避免一条馈线回路的故障导致整个UPS系统失电，同时也需要验证短路保护装置动作时间内母线电压跌落对母线上其他负荷的影响，尽可能避免由于该段时间内的电压跌落导致其他负荷失去功能。

2　短路电流分析模型

进行1E级UPS系统的短路保护性能验证，首先需要准确计算系统某处发生短路时的短路电流大小。正常运行时，1E级UPS系统可以认为是一个恒压源，由逆变器提供稳定可靠的供电电压。根据图1，正常运行时系统的简化分析模型如图2所示。

图2中，Z_1～Z_n为1E级UPS系统供电的1E级负荷1～n的等效负荷阻抗（包括了线路有关阻抗）；Z_{Lc}为逆变器至1E级UPS配电盘的线路有关阻抗。

当系统供电的设备或者线路处发生短路故障时，会由逆变器提供短路电流。当第i条馈线回路发生短路故障时，考虑最极端工况，假定故障发生在线路末端，则该回路只有线路有关阻抗Z_{iL}，假定其他正常回路等效阻抗为Z_m，则等效电路模型如图3所示。

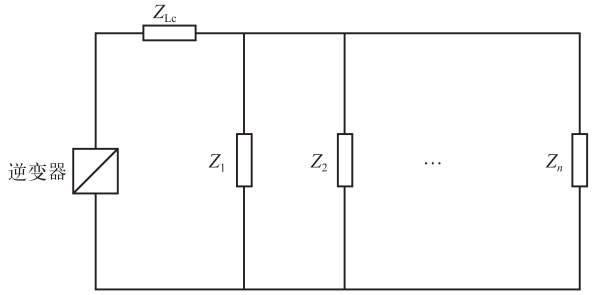

图 2　简化分析模型

Fig. 2 Simplified analysis model

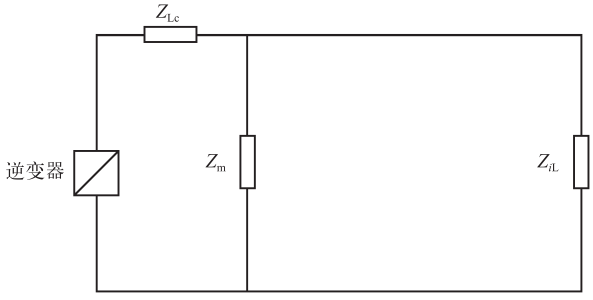

图 3　第 i 条馈线回路故障时的分析模型

Fig. 3 Analysis model of feeder circuit i fault

由于逆变器设计有限流工作特性，在一定的时间内能限制短路电流不超过两倍的额定电流且不跳闸，逆变器宜根据故障电流的情况考虑为一个电压源或电流源。当维持逆变器输出电压情况下的故障电流小于两倍额定电流时，逆变器为电压环控制，可以认为逆变器为恒压源；当维持逆变器输出电压情况下的故障电流大于两倍额定电流时，逆变器的限流控制起作用，逆变器变为电流环控制，将故障电流限制在两倍额定电流，逆变器可当作电流源考虑[2-5]。当第i条馈线回路故障时，逆变器考虑为电压源和电流源等效的电路分别如图4a、b所示。

实际分析时，对于图4a来说，此时故障电流小于两倍的逆变器额定电流。由于逆变器至1E级UPS配电盘的电缆长度短，线径大，Z_{Lc}很小，Z_{Lc}上的电压降相对于逆变器额定电压来说

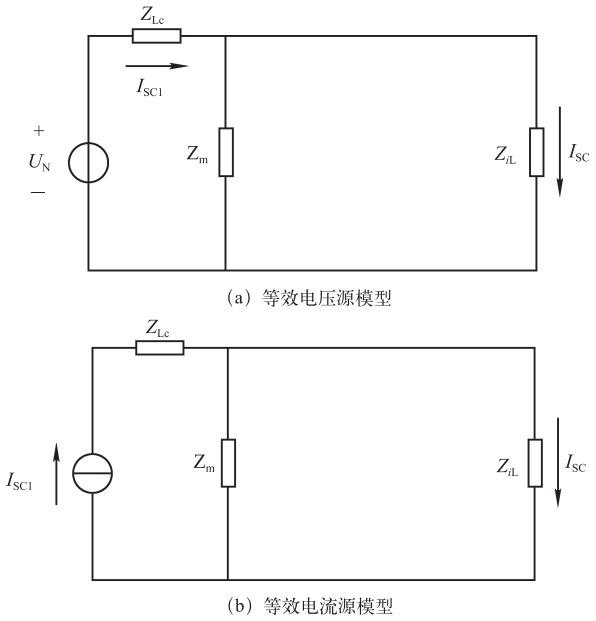

图 4　等效电路模型

Fig. 4 Equivalent circuit model

很小，对计算结果影响也很小，一般可以近似认为Z_{Lc}=0，可以简化计算过程。

除了故障回路外，正常回路的1E负荷包括一系列不同功率和功率因数的设备，假设相关设备为恒阻抗负荷，第i个1E级仪控设备的有功功率为P_i，视在功率为S_i，则可计算得到无功功率Q_i为

$$Q_i = \sqrt{S_i^2 - P_i^2} \tag{1}$$

1E级交流配电盘所带的n个1E级设备去除故障的第m条回路后，总的视在功率S_{ic}为

$$S_{ic} = \sum_{i=1}^{n} P_i + \mathrm{j}\sum_{i=1}^{n} Q_i \quad (i \neq m) \tag{2}$$

则正常负荷馈线回路的等效总阻抗Z_m为

$$Z_m = \frac{U_N^2}{S_{ic}} \tag{3}$$

若相关1E级设备为恒功率负荷，则等效的阻抗计算公式为

$$Z_m = \frac{U_{ic}^2}{S_{ic}} \tag{4}$$

式中，U_{ic}为图3中Z_m两端的实际电压，需结合等效电路分析计算得到。

线路阻抗可根据电缆的规格，从相关设计手册中查询得到[6]。

3　短路电流分析计算

在进行短路电流分析计算时，先以图4a的电压源进行分析计算，观察计算出的逆变器短路故障电流是否大于两倍逆变器的额定电流。根据图4a可得逆变器短路故障电流大小I_{SC1}为

$$I_{SC1} = \frac{U_N}{Z_{L1} + \dfrac{Z_{iL} Z_m}{Z_{iL} + Z_m}} \tag{5}$$

式中，U_N为逆变器额定输出电压。

若根据式（1）计算得到的电流小于逆变器额定电流I_N的两倍，则可认为逆变器处于恒压源模式，可得故障点处的短路故障电流I_{SC}大小为

$$I_{SC} = I_{SC1} \times \frac{Z_m}{Z_{iL} + Z_m} \tag{6}$$

若根据式（1）计算得到的电流大于逆变器额定电流I_N的两倍，则可认为短路时逆变器处于限流状态，逆变器将短路故障电流限制为I_{SC}=2I_N。根据图4b可以得到此工况下故障点处的短路故障电流大小为

$$I_{SC} = 2I_N \times \frac{Z_m}{Z_{iL} + Z_m} \tag{7}$$

计算出某一馈线回路设备处短路故障的短路电流后，结合配电盘处相关馈线回路保护装置的整定值和逆变器的特性，对保护的选择性进行分析。

4　短路电流计算结果与保护装置动作时间分析

根据上述计算方法，结合某核电站的1E级UPS系统相关电缆的长度和规格，以及相关负荷的特性，可以计算得到某一馈线回路i处发生短路故障时图3中各项参数的大小，如下表所示。故障回路正常运行时的计算电流约为2 A。

表中的数据假定非故障回路负荷为恒阻抗负荷，若负荷为恒功率负荷，需根据图4和式（4）计算非故障负荷回路等效阻抗值。

表　短路电流计算模型线路参数

Tab. Line parameters of short circuit current calculation model

（单位：Ω）

	Z_{Lc}	Z_{iL}	Z_m
电阻	0.01	0.49	13.7
感抗	0.005 7	0.011 2	19.2

根据上表的线路和负荷的阻抗值，结合图4a和式（4）~式（6），若将逆变器暂时考虑为电压源，馈线回路i处的短路故障电流大小为I_{SC}=446.1 A。由于逆变器的额定电流为I_N=68 A，计算得到的短路电流I_{SC}＞2I_N，根据逆变器的限流特性，此时逆变器应处于恒流源工作状态，需根据图4b和式（6）来重新计算短路电流。计算可得发生短路故障时的相应支路短路电流大小为I_{SC}=134.3 A。

根据短路电流计算结果，为了满足保护装置的选择性，故障回路的保护装置动作时间需要小于逆变器的短路电流限流承受时间（如100 ms，由设计要求或具体厂家产品的特性确定），此外保护装置的动作时间在可能的情况下还应小于UPS配电盘其他正常回路所带负荷能够承受的电压跌落时间（如50 ms），以避免由于一个回路故障导致其他回路设备丧失功能[7]。

保护装置一般选用断路器或者熔断器，此处以断路器为例对保护装置的选型进行分析。若选用断路器，则断路器短路电流保护需为瞬时动作保护，且断路器动作时间小于逆变器的短路电流限流承受时间和正常回路所带负荷能够承受的电压跌落时间。根据GB 50054，当短路保护装置为断路器时，被保护线路末端的短路电流不应小于断路器瞬时或短延时过电流脱扣器整定电流的1.3倍，则断路器瞬时动作整定电流I_{set3}的大小为

$$1.3I_{set3} \leqslant I_{SC} \tag{8}$$

即I_{set3}≤103.3 A。因此，除了根据馈线回路负荷额定工作电流选取断路器的额定电流外，还需保证断路器瞬时脱扣电流整定值满足上述要求。

根据某回路的短路电流计算结果，结合该回路设备计算电流为2 A，由于该回路设备为非冲击负荷设备，考虑到环境温度对断路器载流能力的影响，可以选择某厂家额定电流I_N=3 A的B或C型脱扣特性微型断路器。某厂家微型断路器的脱扣曲线如图5所示。

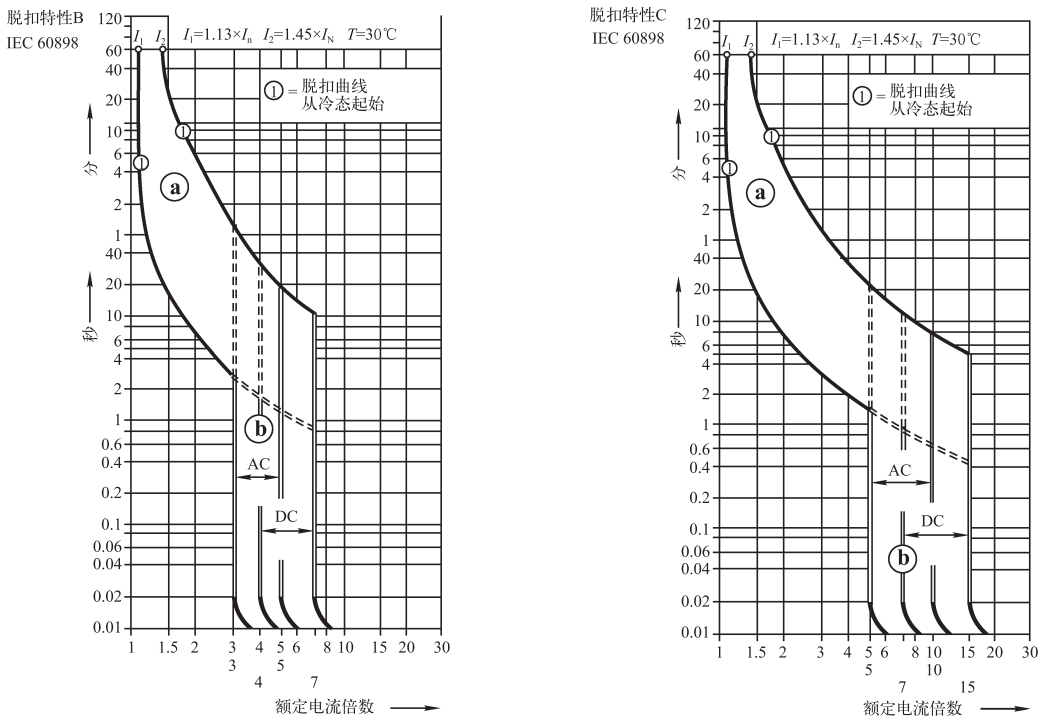

图 5　某厂家微型断路器脱扣曲线

Fig. 5 Tripping curve of miniature circuit breaker of a manufacturer

由图5可以看出，B型脱扣曲线的可靠动作电流为$5I_N$，C型脱扣曲线的可靠动作电流为$10I_N$，均小于I_{set3}，可以在20 ms内可靠动作，既可以满足正常工作时的工作电流要求，又可以在回路线路末端故障情况下及时分段故障回路，且不会导致UPS跳闸或1E级UPS配电盘上的其他1E级负荷丧失功能。

当UPS设置有旁路供电时，由于旁路一般直接由厂内交流电源供电，短路电流会相对大很多，在相关馈线回路断路器选型时，除了考虑上述的灵敏度和选择性外，断路器的短路电流分段能力还需能够承受旁路供电情况下的最大短路电流。旁路供电时，故障电流计算分析方法与常规的低压配电回路分析方法一致，不在本文研究范围。

5 结束语

1E级UPS系统用于给核电站1E级设备供电，以保证核电站的安全。为保障1E级UPS系统的供电可靠性，一个回路设备发生故障时，保护装置需能够迅速动作，减少故障的影响，防止故障扩大，从而影响核电厂的安全性。本文根据核电厂1E级UPS系统的结构特点，建立了系统等效电路模型，结合逆变器的电压和电流控制特性以及负荷特性，建立了系统某一馈线回路发生短路故障时的短路电流分析模型，分析研究了某一馈线回路发生短路故障时保护装置的选型方法。

本文的分析模型和计算方法可用于UPS系统保护配合和保护装置选型的研究。

参考文献

[1] 全国电力电子学标准化技术委员会．不间断电源设备(UPS) 第3部分：确定性能的方法和试验要求：GB/T 7260.3－2003[S]．北京：中国标准出版社，2003．

[2] 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．

[3] 柳彬，谢炜，余跃听，等．逆变电源短路保护及限流策略[J]．舰船科学技术，2011，33(8)：95-98．

[4] 汪洪亮，岳秀梅，裴雪军，等．组合式三相逆变器软硬件限流保护策略[J]．电工技术学报，2008，23(9)：92-97．

[5] 习伟，张哲，陈卫．光伏逆变器短路特性分析[J]．电力系统保护与控制，2015，43(7)：70-74．

[6] 刘屏周，卞铠生，任元会，等．工业与民用配电设计手册[M]．北京：中国电力出版社，2016．

[7] The institute of electrical and electronics engineers．IEEE recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power system：IEEE Std 242—2001[S]．New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers，2001．

[8] 中国机械工业联合会．低压配电设计规范：GB 50054—2011[S]．北京：中国计划出版社，2011．

作者简介

陶 果

陶果（1979－），男，高级工程师，主要从事核电站的电气设计工作。

(收稿日期：2019－09－26)EA