

计及制冷系统和过热保护的含高温超导电缆 配电网可靠性评估方法

吕忠麟, 顾洁, 金之俭

(上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要:为适应高温超导电缆商业化运行需求,提出一种考虑不同应用模式下制冷系统和过热保护影响的含高温超导电缆的配电网可靠性评估方法。依据高温超导电缆制冷系统的工作原理、故障特性及过热保护装置的动作逻辑和自动重合规则,对高温超导电缆系统可靠性进行建模分析。考虑了低压联络和配电线路增效2种典型应用模式下高温超导电缆接入对配电网的可靠性影响,采用融入了计及高温超导电缆的新增故障模式的最小割集法求解配电网可靠性指标,实现含高温超导电缆的配电网可靠性评估。以某实际配电网为算例,通过仿真分析了制冷系统故障和过热保护对配电网不同可靠性指标的影响,并与传统的配电网改造方案进行对比,验证了所提方法的有效性。

关键词:高温超导电缆;配电网;可靠性评估;最小割集法;制冷系统;过热保护

中图分类号:TM732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202303017

0 引言

超导电缆作为一种损耗低、容量大、占地小、环境友好的先进输电介质,能在低电压等级下传输大量电能。自1986年陶瓷氧化物超导体被发现后,使用高温超导材料制造的高温超导(high temperature superconducting, HTS)电缆可以在液氮温区进入超导态,这大幅降低了超导电缆的冷却和运行成本,使其在电力系统中的商业化应用成为可能(本文主要针对高温超导电缆开展研究,后文简称为“超导电缆”)。在土地资源有限的城市负荷密集区,超导电缆可以取代常规电缆作为变电站间联络线和供配电线路,对解决城市配电网面临的变电站扩容困难、输电通道不足等问题具有重要意义。

随着超导输电技术的发展和国内外多个示范工程的落地,超导电缆已经初步进入商业化运行阶段。日本东京电力公司66 kV/200 MV·A超导电缆于2012年和2017年在横滨2次成功并网运行,证明了超导电缆系统长期运行的可靠性^[1]。文献[2]和文献[3]分别介绍了韩国“Shingal”23 kV超导电缆项目和我国上海35 kV国产公里级超导电缆示范工程,项目分别于2019年和2021年正式投运,均采用超导电缆作为变电站的低压联络线,以提高变电站负荷转供能力。

可靠性是配电网规划设计和安全经济运行的重要指标。由于超导电缆的系统结构、电气特性以及应用模式与常规电缆存在较大差异,使得现有的配电网可靠性评估方法难以直接用于超导电缆接入后配电网的可靠性计算。因此,为指导超导电缆在配电网中的应用决策,亟需研究含超导电缆的配电网可靠性评估方法。

目前,针对超导电缆系统本体可靠性的研究主要是从超导电缆制冷系统、超导电缆故障特性及保护两方面展开:文献[4]介绍了超导电缆不同制冷方式的原理及优缺点;文献[5]结合具体示范工程提出了采用开式制冷机作备用的制冷机备用方式;文献[6]利用数值仿真和短样测试,研究了超导电缆遭受短路事故和接地故障时的温升特性以及压力变化;文献[7]提出了包含反时限过热保护和自恢复技术在内的超导电缆保护系统配置方案。上述文献对影响超导电缆本体可靠性的制冷系统、保护装置等因素进行了讨论,但并未从配电网的角度深入分析各因素对含超导电缆的配电网可靠性的影响。

已有少量文献对含超导电缆的配电网可靠性进行了初步探索。文献[8]基于系统仿真验证了故障位置、运行方式和故障限流措施对配电网中超导电缆故障特性的影响。文献[9]提出超导电缆本体的三状态可靠性模型,并初步分析了计及超导电缆降额运行状态的配电网可靠性。文献[10]考虑了过热保护和自动重合闸的作用,对含单一超导电缆的辐射状配电网可靠性进行了评估。上述文献虽能简单计算出含超导电缆的配电网可靠性指标,但仍存在未考虑不同应用模式下多条超导电缆接入对配电网可靠性的影响的问题,也未同时计及制冷系统和过

收稿日期:2022-08-18;修回日期:2023-02-13

在线出版日期:2023-03-14

基金项目:国家重点基础研究计划项目(2016YFB0900100);上海市科委科研计划资助项目(18DZ1100303)

Project supported by the National Key Research Program of China(2016YFB0900100) and the Project Funded by Shanghai Science and Technology Committee(18DZ1100303)

热保护的影响,因此提出的可靠性评估方法较为简单。另外,算例中超导电缆的应用模式也没有考虑配电网经济性和可靠性的实际需求及相关法规、标准和导则的要求,不能真实反映其接入后配电网的拓扑结构和运行方式。

针对以往研究的不足,本文提出了一种含超导电缆的配电网可靠性评估方法。首先,根据超导电缆系统的特点,以制冷系统和过热保护为重点,对超导电缆系统的可靠性进行建模分析,并基于低压联络和配电线路增效2类应用模式,研究超导电缆系统非正常运行状态对配电网可靠性造成的影响。随后,利用故障模式后果分析将超导电缆接入的影响融入最小割集法中,得到含超导电缆的配电网可靠性评估算法。最后,基于某实际高压配电网进行了详细的算例分析。

1 超导电缆系统可靠性分析

超导电缆系统由超导电缆本体、终端、制冷系统及监控保护系统4个部分组成。与传统电缆不同,超导电缆系统的运行状态除了与普通线路类似的正常工作和故障停运外,还须考虑超导电缆失超带来的影响。

1.1 超导电缆系统的三状态可靠性模型

根据超导电缆系统的结构,通过故障模式后果分析,可以将超导电缆系统运行情况划分为正常态、停运态和降额运行3种运行状态,如附录A图A1所示。

当所有设备都正常运行时,超导电缆系统处于正常态。若超导电缆本体或电缆终端出现故障,则超导电缆必须立即停止工作,以防对电缆造成永久性损伤,即转入停运态。此外,超导电缆被继电保护装置切除时,也视为其进入停运态。当制冷系统或对应终端发生故障时,超导电缆失超,此时超导电缆中的高温超导材料层恢复陶瓷导电特性,由电缆中原本起支撑作用的金属骨架(一般是铜骨架)进行导电。此时铜骨架载流量虽低于超导电缆额定容量,但仍能传输部分容量,由此将这种运行状态视作降额运行状态。

制冷系统和保护装置对超导电缆系统可靠性的影响较为复杂,本文将从结构和工作机理出发,分析其故障模式及对配电网可靠性的影响。

1.2 超导电缆制冷系统对配电网可靠性的影响

1.2.1 制冷系统的建模

临界电流是影响超导材料电阻率的重要参数,主要受到温度、磁场等因素的影响。文献[11]对超导材料的临界状态进行了详细的理论分析和仿真模拟,并提出了Bean模型和改进Kim模型2种超导体临界状态模型。考虑超导电缆屏蔽层和电缆绕制工

艺的影响,在工程应用时可以忽略磁场的变化,即仅考虑温度对临界电流的影响^[12],如式(1)所示。

$$J_c(T) = \begin{cases} J_c(T_{ref}) \left[T_{ref} \frac{(T_c - T)^\alpha}{(T_c - T_{ref})^\alpha} \right] & T_{ref} < T \leq T_c \\ 0 & T > T_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: α 为超导带材特征参数; T 为超导带材温度; J_c 为临界电流密度; T_{ref} 为参考温度,一般取 $T_{ref}=70\text{ K}$; $T_c=92\text{ K}$ 为钇钡铜氧超导带材的临界温度。

可见,保证制冷系统的正常工作以维持超导电缆的低温运行环境对超导电缆系统至关重要。制冷系统主要由储液罐、制冷机、液氮泵等设备组成,为保证制冷系统运行可靠性,通常会配置备用制冷机。储液罐接收电缆处返回的液氮,制冷机则用于冷却液氮,冷却后的液氮由液氮泵送回电缆。

制冷系统各设备间为串联结构,主制冷机和备用制冷机间为并联结构,由串并联公式可求得冷却系统的故障率 λ_s 和修复率 μ_s 分别为:

$$\begin{cases} \lambda_s = \lambda_p + \lambda_T + \frac{\lambda_{MR} \lambda_{BR} (\mu_{MR} + \mu_{BR})}{\mu_{MR} \mu_{BR} + \mu_{MR} \lambda_{BR} + \lambda_{MR} \mu_{BR}} \\ \mu_s = \frac{\lambda_s}{\frac{\lambda_p}{\mu_p} + \frac{\lambda_T}{\mu_T} + \frac{\lambda_{MR} \lambda_{BR}}{\mu_{MR} \mu_{BR} + \mu_{MR} \lambda_{BR} + \lambda_{MR} \mu_{BR}}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: λ_p 、 λ_T 、 λ_{MR} 、 λ_{BR} 和 μ_p 、 μ_T 、 μ_{MR} 、 μ_{BR} 分别为液氮泵、储液罐、主制冷机、备用制冷机的故障率以及修复率。

当制冷系统发生故障时,超导电缆因交流损耗产热及恒温系统漏热而温度缓慢上升。当温度超过临界温度时,超导电缆进入失超状态,超导层电阻增加,并联铜骨架层开始分流并产热。如果温度持续上升,达到超导电缆最高允许温度时,将会造成电缆永久性损伤,因此必须采取相应措施控制超导电缆温度,主要有以下2种方法。

1)延时停运。有研究表明,制冷系统发生故障后,超导电缆系统可以在额定电流下运行数小时^[9]。因此当配电网中有备用线路或备用电源时,可以等待超导电缆所供给的负荷转移后再将超导电缆停运。

2)降额运行。考虑成本因素和多重故障的影响,在规定时间内系统并非总是有足够的转移负荷能力。此时超导电缆系统可以在制冷系统发生故障后,通过调度切除部分重要程度较低的负荷,以减少超导电缆产热进而维持较长时间的降额运行状态,等待制冷系统修复。

为减少制冷系统故障对超导电缆可靠性的影响,并联运行的超导电缆一般会采用独立的制冷系统,同时配备备用制冷机。备用制冷机配置方案一般包括2种,如表1所示。2种备用制冷机配置方案各有优劣^[13],应对可靠性、经济性等因素进行综合考虑以选取合适的方案。

表1 备用制冷机配置方案

Table 1 Configuration schemes of backup refrigerator

备用制冷机配置方案	备用策略	示范工程
多台制冷机并联	同时配备多台制冷机并联运行,其中1~2台作为备用	Yokohama Project
闭式和开式制冷相结合	闭式制冷机作为主制冷机,开式制冷机作为备用制冷机	上海宝钢超导电缆项目

1.2.2 制冷系统故障对配电网可靠性的影响

以降额运行状态为例,制冷系统故障将会对超导电缆载流能力造成影响,超导电缆进入降额运行状态,此时的超导电缆容量 P_J 如式(3)所示。

$$P_J = \eta P_{\text{HTS}} \quad (3)$$

式中: P_{HTS} 为超导电缆额定容量; η 为超导电缆降额运行系数,即保证超导电缆温度不超过最大允许温度的前提下超导电缆容量与额定容量之比,大小取决于制冷条件和铜骨架截面积。

当制冷系统发生故障时,若电缆留有足够的冗余容量或可通过投切备用线路转移负荷,则超导电缆降额运行不会造成负荷失电;若电网同时发生多重故障,造成线路备用容量不足,则处于降额运行状态的超导电缆可能发生超载,应按照切负荷原则切除负荷,由此造成负荷部分失电。

因此,在进行含超导电缆的配电网可靠性计算时,应将超导电缆制冷系统故障造成的降额运行状态作为新的故障状态,建立并识别含超导电缆降额运行状态的配电网故障模式,并调整配电网可靠性指标计算公式。

1.3 超导电缆过热保护对配电网可靠性的影响

1.3.1 超导电缆过热保护的逻辑及自动重合闸规则

鉴于超导输电系统结构与运行特点,含超导电缆的配电网保护方案除配置电流保护、差动保护等常规保护外^[14-15],还应针对超导电缆进入失超态时的温度变化设计过热保护,防止超导电缆在耐受短路电流冲击时因温度过高造成永久性损坏。由此,本文采用基于电流水平和温升的综合保护方案^[16],其原理如图1所示。

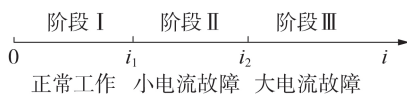


图1 超导电缆综合保护方案原理

Fig.1 Principle of comprehensive protection scheme for HTS cable

该保护的逻辑规则如下:

1)当流经超导电缆的电流 i 低于小故障电流临界值 i_1 时,超导电缆正常工作,保护不动作;

2)当流经超导电缆的电流高于大故障电流临界值 i_2 时,超导电缆遭受严重故障电流,将对电缆全线造成不可逆损害,同时可能因绝缘击穿引起火灾,保护应立即动作将超导电缆切除, i_2 由绝缘材料性能、超导带材永久损坏温度等综合考虑决定;

3)当超导电缆电流位于 i_1 和 i_2 之间时,超导电缆遭受小故障电流,此时超导电缆进入失超态,温度逐渐升高,应引入过热保护对电缆温度进行实时监测,并由温度阈值 t 判断保护是否动作。

温度阈值 t 应根据超导电缆的耐热能力和工况进行整定,一般情况下可取超导电缆的最高自恢复温度,即在当前冷却条件下,故障隔离后超导电缆能自动恢复至临界温度以下的最高温度。由于温度等非电气量测量信号变化较慢,因此可选择对超导电缆短路电流进行实时监测,并在线计算超导电缆温度变化,以确定保护动作时间^[7]。

超导电缆经过热保护切除后,一段时间后可重新恢复超导态,因此需为过热保护设置自动重合闸,使超导电缆重新投入运行,以提高电网可靠性水平。重合闸时限可根据超导电缆切除前的发热量及制冷系统传热关系进行计算^[17]。

1.3.2 超导电缆系统过热保护对配电网可靠性的影响

由于超导电缆过热保护和自动重合闸机制的存在,会对含超导电缆的配电网可靠性造成影响:当超导电缆近区线路发生短路故障时,由于短路位置较近,流经超导电缆的短路电流较大,超导电缆因过热而切除,造成故障范围扩大,使得原本不会造成停电的 $N-1$ 故障演变为 $N-2$ 故障,进而影响配电网可靠性水平,如图2所示;当超导电缆远区线路发生故障时,由于短路点较远,短路电流相对较小,可允许超导电缆继续运行,不会影响配电网可靠性水平。

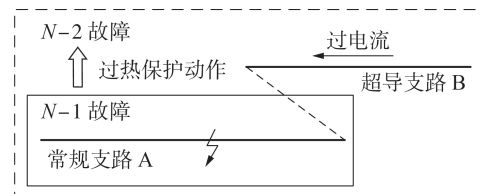


图2 过热保护影响示意图

Fig.2 Schematic diagram of overheating protection impacts

综上所述,在进行含超导电缆的配电网可靠性评估时,本文将对过热保护和自动重合闸的处理分为以下3个步骤:①将过热保护动作时限固定为保护装置平均动作时间,并根据超导电缆最大允许温度的等效发热功率计算该时限下的最大耐受电流;②对含超导电缆的配电网 $N-2$ 故障模式进行故障扫描分析,在 $N-2$ 故障中一条支路发生短路时,流经超

导电缆的电流若超过超导电缆最大耐受电流,则将该支路短路、超导电缆正常运行视为新的故障模式,反之则无须考虑该故障模式;③计算计及该故障模式的配电网可靠性指标。

2 计及超导电缆制冷系统和过热保护的配电网可靠性评估方法

超导电缆以不同形式接入配电网,其制冷系统和过热保护对配电网可靠性的影响方式也不尽相同。因此有必要结合配电网规划运行现状与超导输电系统的特点,设计超导电缆接入配电网的典型应用模式,并基于此提出含超导电缆的配电网可靠性评估方法。

2.1 超导电缆接入配电网的应用模式

目前国内外超导电缆接入配电网的应用场景主要分为通过超导电缆实现变电站互联以提高配电网可靠性以及使用超导电缆替代常规电缆进而提高配电线路效率2种。本文根据超导输电系统特性及配电网规划运行要求,设计了上述场景下超导电缆接入的典型应用模式。

2.1.1 站间低压联络

为实现110 kV变电站全区满足主变“N-1”条件,通常情况下变电站可以通过扩建第3台主变来满足要求,但部分变电站受站址条件限制无法扩建,因此变电站必须具备事故情况下相互支援的能力。变电站互联是实现变电站相互支援的有效手段,但站间高压联络会占用变电站的变电容量及高压出线间隔,这对于部分负载率较高、扩建困难的变电站而言不易实现。

针对这一问题,可利用超导电缆能在较低电压等级下传输大量电能的优势,将超导电缆作为变电站间的低压联络线,例如使用10 kV超导电缆实现110 kV变电站间10 kV母线互联,系统结构见图3。

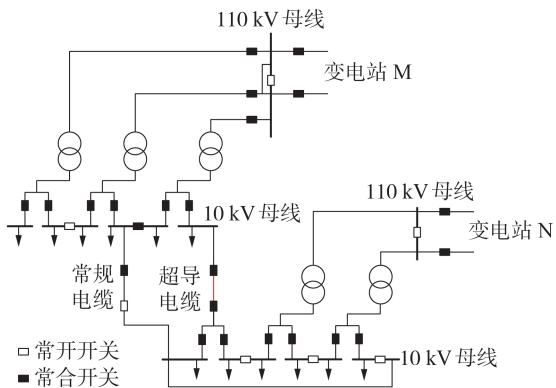


图3 超导电缆在低压联络应用模式下的结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of HTS cable structure under low-voltage tie-line application mode

2.1.2 配电线路增效

针对配电网规划建设阶段常会遇到的线路通道受限、变电站出线间隔不足、输电线路损耗过高等问题,在配电网规划建设阶段可以使用相同或较低电压等级的超导电缆替代常规电缆。其中使用相同电压等级的超导电缆替代常规电缆称为同电压等级替代,例如使用10 kV超导电缆替代10 kV常规电缆;以低电压等级的超导电缆替代高压常规电缆则称为低电压等级替代,例如使用10 kV超导电缆替代110 kV常规电缆。上述2种替代方式下的系统结构分别如图4、5所示。

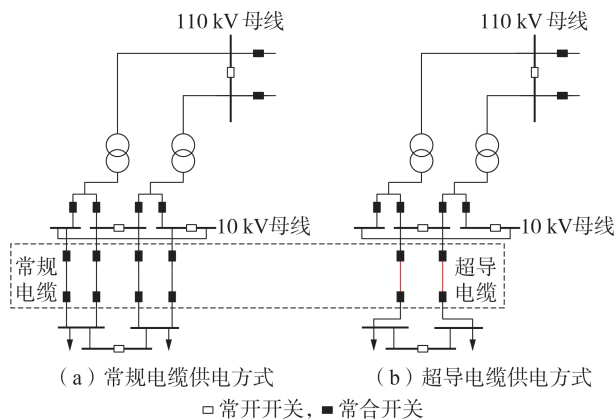


图4 超导电缆在配电增效(同电压等级替代)应用模式下的系统结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of system structure with HTS cable under power distribution efficiency improvement application mode (same voltage level replacement)

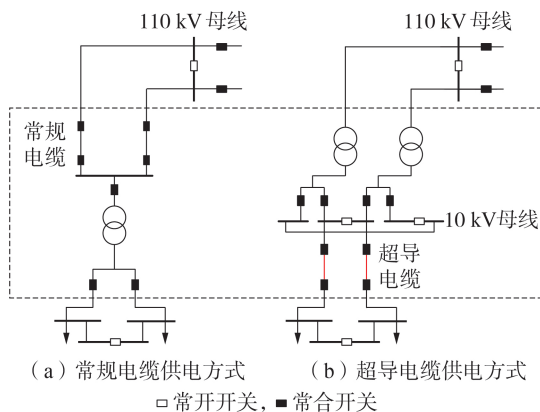


图5 超导电缆在配电增效(低电压等级替代)应用模式下的结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of system structure with HTS cable under distribution efficiency improvement application mode (low-voltage level replacement)

2.2 最小割集法

当前常用的配电网可靠性评估方法主要分为解析法^[18]和模拟法^[19]。最小割集法是解析法的一种,该算法依赖于元件的故障状态模型和负荷点的故障模式,通过求解负荷点最小割集矩阵来计算系统可

可靠性指标。

如前文所述,超导电缆接入对配电网可靠性的影响并非仅限于其本体的可靠性模型,而是与系统中其他元件相互作用进而影响配电网可靠性水平。本文在最小割集法的基础上进行改进,利用最小割集作为负荷点是否停电的评判依据,能够处理超导电缆接入后新增的各种故障模式,可以充分发挥解析法物理概念清楚的优点,其可靠性计算模型能直观反映不同应用模式下超导电缆制冷系统和过热保护对配电网可靠性的影响方式。

最小割集法计算过程主要分为3个步骤:①形成遍历路径表;②求取负荷点最小割集;③计算系统可靠性指标。对于含环网的配电系统,采用堆栈的方式遍历路径时,因其由多个电源点供电,且一个节点可能既是电源节点又是负荷节点,导致出栈条件不明确。此时可以设置虚拟负荷点,以虚拟支路将虚拟负荷点与原负荷点相连,将虚拟负荷点作为路径搜索终点。考虑到超导电缆相较于常规电缆结构更为复杂,其故障修复时间更长,一般为数天,不满足修复率远大于故障率的条件,因此在进行并联可修复系统可靠性计算时应采用状态空间法求解。

2.3 不同应用模式下含超导电缆的配电网可靠性指标求解

超导电缆以不同应用模式接入对配电网可靠性影响方式不同,因此首先应判断超导电缆的应用模式:当超导电缆支路两端均为变电站节点时,为低压联络线路;当超导电缆支路一端为变电站节点,另一端为负荷节点时,为配电增效线路。在区分超导电缆的应用模式后,可分别计算不同应用模式下超导电缆接入对系统可靠性的影响。

2.3.1 低压联络场景下的新增故障模式与可靠性参数求取

当超导电缆用作低压联络时,分别考虑制冷系统故障和过热保护的影响,对造成用户停电的新增故障模式进行分析,并求取对应可靠性参数。

1)计及制冷系统故障的影响。本文采用降额运行的方式应对超导电缆制冷系统故障,即超导电缆制冷系统发生故障时超导电缆进入降额运行状态,此时的超导电缆容量 P_j 可通过式(3)求得。当配电网系统满足 $N-1$ 可靠性要求时,单独一条超导联络线路故障或降额运行不会造成负荷停电,因此需要对含超导联络线的二阶最小割集进行分析,新增一种新故障模式 M_{cl} ,如表2所示。

该故障模式将造成该负荷点部分停电,停电用户数由系统潮流计算结果和超导电缆降额运行系数 η 得出,算法中应对含超导联络线的二阶最小割集进行遍历,当二阶最小割集中常规线路因故障隔离,

表2 M_{cl} 的故障条件与可靠性参数
Table 2 Fault conditions and reliability parameters of M_{cl}

故障模式	元件	元件状态	对应参数
M_{cl}	超导联络线 常规线路	处于降额运行状态且过载 因故障停运	λ_{cl} 、 U_{cl} 和 n_{cl}

超导联络线降额运行时,进行潮流计算并判断线路是否过载,若过载则根据并联关系求取该故障状态的故障率 λ_{cl} 和平均故障持续时间 U_{cl} ,并计算停电用户数 n_{cl} ,如式(4)所示。

$$n_{cl} = \frac{P_c}{P_L} n \quad (4)$$

式中: P_c 为线路过载的切负荷量; P_L 为该负荷点总用电负荷; n 为该负荷点用户数。

随后将新增故障模式的停电频率和持续时间按附录A式(A1)叠加到系统可靠性指标上,包括系统平均停电频率指标(system average interruption frequency index, SAIFI)、系统平均停电持续时间指标(system average interruption duration index, SAIDI)、系统平均供电可用率指标(system average service availability index, SASAI)和系统电量不足指标(system energy not service index, SENSI)^[20]。

2)计及过热保护的影响。当超导电缆作为低压联络线接入多电源供电的配电网时,由于联络线两侧均有电源,系统各处的短路故障都可能造成超过阈值的短路电流流经超导电缆,超导电缆自动切除。因此应新增一种故障模式 M_{hl} ,如表3所示。

表3 M_{hl} 的故障条件与可靠性参数
Table 3 Fault conditions and reliability parameters of M_{hl}

故障模式	元件	元件状态	对应参数
M_{hl}	超导联络线 常规线路	处于正常态,因过热保护动作切除 因故障停运	λ_{hl} 、 U_{hl} 和 n_{hl}

在求解过程中对含超导联络线的二阶最小割集进行遍历,计算常规线路发生故障时超导联络线的短路电流大小,若高于给定电流限值,则将该故障模式的停运率和停运时间叠加到系统可靠性指标上。

由于联络线正常运行的概率远高于故障概率,该故障模式的故障率 λ_{hl} 可认为与常规线路的故障率 λ_{con} 相等。在温度恢复至允许范围后,超导电缆将重新投入运行,此时常规电缆故障还未修复,由此可知故障修复时间 U_{hl} 与自动重合闸时限 U_{ar} 相等。由于负荷点二阶最小割集中2条支路均停运,因此停电用户数 n_{hl} 等于该负荷点用户数 n 。

2.3.2 配电线路增效场景下的新增故障模式与可靠性参数求取

当超导电缆用作配电线路增效时,新增计及制

冷系统故障和过热保护的故障模式,并求取可靠性参数。

1) 计及制冷系统故障的影响。配电增效场景下,负荷点经由 2 条超导电缆进行双侧电源供电,并采用 2 套独立的制冷设备。考虑超导电缆制冷系统故障时,负荷点将新增 2 种故障模式 M_{cp} 和 M_{hp} ,如表 4 所示,其中超导电缆停运态指因电缆本体故障或终端故障引起的系统停运。

表 4 M_{cp} 和 M_{hp} 的故障条件与可靠性参数

Table 4 Fault conditions and reliability parameters of M_{cp} and M_{hp}

故障模式	元件	元件状态	对应参数
M_{cp}	超导线路 a	降额运行	λ_{cp} 、 U_{cp} 和 n_{cp}
	超导线路 b	降额运行	
M_{hp}	超导线路 a	停运态	λ_{hp} 、 U_{hp} 和 n_{hp}
	超导线路 b	降额运行	

a) 2 条超导电缆均降额运行。

该故障状态的故障率 λ_{cp} 和平均故障持续时间 U_{cp} 可以根据制冷系统的故障率 λ_s 和平均故障持续时间 U_c 利用并联公式求解。当超导电缆额定容量与负荷大小相等时,可计算停电用户数 n_{cp} 为:

$$n_{cp} = (1 - 2\eta)n \quad (5)$$

b) 1 条超导电缆降额运行,1 条超导电缆停运。

该故障模式实际包含 2 种情况:①超导线路 a 停运,超导线路 b 降额运行;②超导线路 a 降额运行,超导线路 b 停运。因此求解该故障状态的故障率 λ_{hp} 和故障修复时间 U_{hp} 时应将故障率乘以 2。计算停电用户数 n_{hp} 如下:

$$n_{hp} = (1 - \eta)n \quad (6)$$

2) 计及过热保护的影响。在配电增效场景下,考虑功率流动和断路器的影响,仅超导电缆下级线路故障会导致超导电缆切除,而同级线路和上级线路故障不会造成超导电缆过热保护动作。因此仅考虑当前电压等级系统对可靠性的影响时,将 110 kV 降压站和 10 kV 开关站视为系统负荷,可不计超导电缆过热保护对配电网可靠性的影响。

2.4 算法流程

本文提出的超导电缆接入配电网的可靠性评估流程如图 6 所示。

3 算例分析

3.1 算例电网及数据

以某 110 kV 城市配电网^[21]为例,对本文提出的算法进行应用验证。该高压配电网共有 10 个节点,其中有 3 个电源节点,各节点之间主要通过 110 kV 地下电缆和少量 110 kV 架空线路连接。本文采用 10 kV 超导电缆对该电网进行改造,依据图 3 所示低

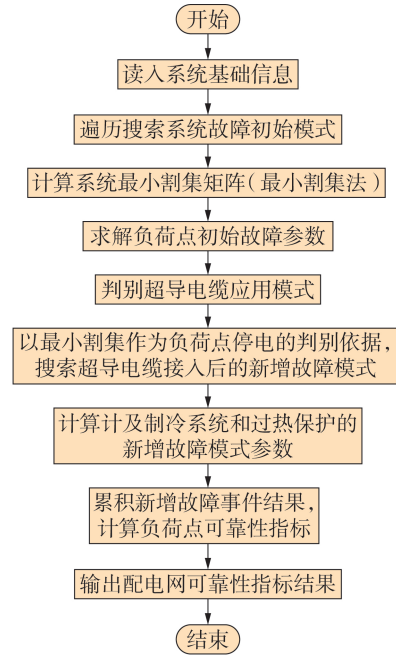


图 6 超导电缆接入配电网的可靠性评估流程图

Fig.6 Flowchart of distribution network reliability evaluation with HTS cable

压联络和图 5 所示低电压等级配电增效的应用模式,减少了 110 kV 电缆和变压器的使用数量。改造后的算例电网共含 2 条低压联络线超导电缆支路和 5 条配电增效超导电缆支路,系统拓扑结构具有较高的可靠性,其网络结构如图 7 所示。各类设备的可靠性参数如表 5 所示。

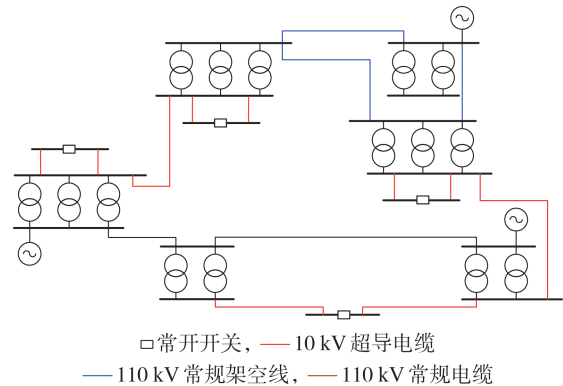


图 7 含超导电缆的某城市配电网网络结构

Fig.7 Distribution network structure of a city with HTS cables

表 5 设备可靠性参数

Table 5 Reliability parameters of equipments

元件	故障率	故障修复时间 / h
断路器	0.05 次 / a	8
110 kV 常规线路	0.0239 次 / (km·a)	8
超导电缆	0.01 次 / (km·a)	200
冷却系统	0.974 7 次 / a	72
终端	0.005 次 / a	90

3.2 算例结果分析

3.2.1 制冷系统和过热保护对配电网可靠性的影响

对图7所示电网按表6中列出的4种情况分别进行可靠性计算(表中“√”、“×”分别表示计及和不计及该项因素),求解SAIFI值 I_{SAIFI} 、SAIDI值 I_{SAIDI} 、SASAI值 I_{SASAI} 和SENSI值 I_{SENSI} 这4种系统的可靠性指标值,如表7所示。

表6 系统可靠性计算情况分类

Table 6 Classifications of calculating system reliability

情况	计及制冷系统故障	计及过热保护
1	×	×
2	√	×
3	×	√
4	√	√

表7 配电网可靠性评估结果

Table 7 Reliability evaluation results of distribution network

情况	$I_{SAIFI} / [次 \cdot (位 \cdot a)^{-1}]$	$I_{SAIDI} / [h \cdot (位 \cdot a)^{-1}]$	$I_{SASAI} / \%$	$I_{SENSI} / (MW \cdot h \cdot a^{-1})$
1	0.000 201	0.003 06	0.999 999 65	1.224
2	0.001 178	0.038 25	0.999 995 60	15.300
3	0.025 019	0.003 16	0.999 999 64	1.266
4	0.025 996	0.038 36	0.999 995 60	15.340

由可靠性计算结果可得如下结论。

1) 计及制冷系统故障的影响后,系统各可靠性指标均有较明显变化。其原因是制冷系统的故障率和故障修复时间均高于电缆线路本体,超导电缆进入降额运行状态后载流能力下降,造成负荷点部分停电。为减少制冷系统故障的影响,应从提高其可靠性水平的角度出发:①通过采用可靠性更高的制冷设备或增加制冷机冗余量的方式降低制冷系统故障率;②通过改善制冷系统维修工艺或增加维修人员的方式减少制冷系统故障持续时间。

2) 若仅考虑过热保护的影响,则由于部分N-2故障的发生条件转变为N-1故障,导致负荷点故障率增加,进而使得SAIFI值明显增加。同时,过热保护自动重合闸的时限相对较短,远小于线路故障修复时间,因此表征故障持续时间的SAIDI、SASAI和SENSI变化不大。为此,可采用电网故障限流技术如常规限流器、超导限流器^[22]、故障限流超导电缆^[23]等方式降低短路电流水平,使得超导电缆在短路故障隔离前不会因温度越限而切除,进而提高系统可靠性水平。

分别计算制冷系统、过热保护和线路故障引起的停电事故对配电网可靠性指标的影响可知,含超导电缆接入的配电网频率性指标(如SAIFI)受超导电缆过热保护的影响最大,而时间性指标(如SAIDI、SASAI等)则受超导电缆制冷系统故障的影响最大, I_{SASAI} 占比均在90%以上。

改变自动重合闸时限,计算超导电缆接入后配电网的可靠性指标,图8给出了系统SAIDI和SASAI随自动重合闸时限改变而变化的情况。由图可知:随自动重合闸时限的减少,系统停电持续时间下降,供电可用率上升。当自动重合闸时限较小时,系统可靠性水平的提升尤为明显。因此在实际运行中,当超导电缆因外部故障而退出运行时,应合理计算超导电缆自动重合闸时限,保证超导电缆尽快重新投入运行,以提高电网供电可靠性。

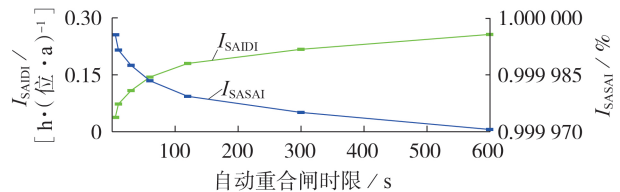


图8 I_{SAIDI} 和 I_{SASAI} 在不同自动重合闸动作时限下的变化情况

Fig.8 I_{SAIDI} and I_{SASAI} vs. different action time limits of automatic reclosure

部分负荷点在不同情况下的故障率和停电持续时间分别见附录A表A1、A2。其中负荷点5受制冷系统和过热保护的影响均最大,这是因为其位于超导低压联络线的受电端,无论联络线进入降额运行或是因过热保护而跳闸,该负荷点供电均会受到影响。负荷点6虽然同样位于超导低压联络线受电端,但由于其相距电源点相对较远,当外部发生短路故障时,联络线受到的电流冲击低于过热保护动作整定值,因此不受过热保护的影响。

3.2.2 超导改造方案和常规改造方案可靠性比较

为比较采用超导电缆改造方案和常规线路改造方案时配电网的可靠性,使用最小割集法计算该电网使用110 kV电缆和架空线连接各变电站时的可靠性指标,与超导改造方案的比较如表8所示。

表8 不同改造方案的可靠性评估结果

Table 8 Reliability evaluation results of different reconstruction schemes

改造方案	$I_{SAIFI} / [次 \cdot (位 \cdot a)^{-1}]$	$I_{SAIDI} / [h \cdot (位 \cdot a)^{-1}]$	$I_{SASAI} / \%$	$I_{SENSI} / (MW \cdot h \cdot a^{-1})$
超导方案	0.025 996	0.038 36	0.999 995 6	15.34
常规方案	0.016 506	0.131 84	0.999 985 0	52.74

由两者比较可见,超导改造方案相较常规改造方案,SAIDI、SASAI和SENSI有显著的改善,而SAIFI有所增加。这是由于典型应用模式下超导电缆接入配电网能提高变电站转供能力并增加负荷供电线路的备用容量,进而改善电网拓扑结构,如此若不计制冷系统和过热保护的影响,则超导改造方案能显著

改善配电网各项可靠性指标。而结合表7分析结果可知,当计及制冷系统和过热保护的影响时,配电网可靠性实际将在此基础上有所下降。因此,在含超导电缆的配电网规划设计时,应通过不同方案下的可靠性成本效益分析,择优确定电网改造方案。

4 结论

本文从超导电缆制冷系统故障和过热保护对配电网可靠性的影响入手,在设计超导电缆接入配电网典型应用模式的基础上,基于改进最小割集法和故障模式后果分析提出了一种含超导电缆的配电网可靠性评估方法。本文主要得到以下结论。

1)相较于常规电缆,制冷系统和过热保护的存在会直接影响超导电缆系统的可靠性。本文理论分析和算例结果表明,制冷系统发生故障时超导电缆进入降额运行状态,这会对配电网的可靠性水平造成不利影响,其程度主要受制冷设备可靠性水平、备用方式、修复时间、降额运行比例等因素的影响。超导电缆的过热保护及自动重合闸的存在则会造成配电网可靠性频率指标较明显的下降,通过提高设备维修效率、抑制短路电流水平等举措能有效改善该问题。

2)相较常规电网改造方案,超导电缆的接入能有效改善配电网可靠性时间指标,但停电频率指标有所增加,因此应通过可靠性成本效益对比择优选择最佳方案,以最大限度发挥超导电缆对配电网可靠性的改善作用。

3)本文提出的超导电缆接入配电网的可靠性评估方法通过新增故障模式的形式量化、直观地反映不同应用模式下超导电缆对配电网可靠性的影响方式,使研究人员很容易看出应该优先从哪几个方面入手改善超导输电系统可靠性。

随着超导输电技术的快速发展和超导电缆商业化的不断推进,亟须建立一套全面、准确的含超导电缆的配电网可靠性评估体系。本文提出的可靠性评估方法中尚未计及超导电缆过热保护和自动重合闸动作时限的在线计算,同时在故障模式分析方面也未充分考虑负荷转供和制冷系统不同备用方式的影响等问题,后续将在上述方面进行更深入的研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] MASUDA T, WATANABE M, MIMURA T, et al. The 2nd in-grid operation of superconducting cable in Yokohama Project [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1559(1): 012083.
- [2] LEE C, SON H, WON Y, et al. Progress of the first commercial project of high-temperature superconducting cables by KEPCO in Korea [J]. Superconductor Science and Technology, 2020, 33(4): 044006.
- [3] 马爱清, 张杨欢, 吕江平, 等. 首条国产公里级高温超导电缆输

电特性分析[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1206-1213.

MA Aiqing, ZHANG Yangchuan, LÜ Jiangping, et al. Transmission characteristics analysis of first domestic km-level HTS cables [J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1206-1213.

- [4] 唐雨晴, 喻志广, 朱绍伟. 高温超导电缆冷却系统现状与发展 [J]. 低温与超导, 2019, 47(1): 1-8.
TANG Yuqing, YU Zhiguang, ZHU Shaowei. Current situation and development of cooling system for HTS cable [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2019, 47(1): 1-8.
- [5] ZONG X, WEI D, HAN Y, et al. Development of 35 kV 2000 A CD HTS cable demonstration project [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 1-4.
- [6] MASUDA T, MIMURA T. A study on the actual application of superconducting cables to the network [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, 32(4): 1-4.
- [7] 黄金朋. 适应高温超导电缆接入的继电保护技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
HUANG Jinpeng. Research on the relay protection technology adaptive to high temperature superconducting cable access [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [8] HUANG H, TANG Y, REN L, et al. Simplified design of R-SFCL with shunt reactor for protecting HTS cable in distribution network [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 1-5.
- [9] CHENG L, FENG H, CHANG Y, et al. Reliability analysis of HTS cable systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1251-1259.
- [10] 焦振. 高温超导电缆线路对电网可靠性的影响 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
JIAO Zhen. The effect of high temperature superconducting cable for the reliability of power grid [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [11] ZHANG Z. Electrical characterizing of superconducting power cable consisted of second-generation high-temperature superconducting tapes [D]. Bath, UK: University of Bath, 2016.
- [12] 张臻哲. 适用于超导电缆接入的电网运行控制技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
ZHANG Zhenzhe. Research on power grid operation and control technology adaptive to high temperature superconducting cable access [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [13] YOSHIDA S. Cryogenic cooling system for HTS cable [J]. Progress in superconductivity and cryogenics, 2017, 19(2): 1-8.
- [14] KO E Y, LEE S R, SEO S, et al. Impact of smart HTS transmission cable to protection systems of the power grid in South Korea [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5): 1-5.
- [15] 余洪, 梁臣, 吴通华, 等. 国产公里级高温超导线路保护优化方案 [J]. 广东电力, 2021, 34(7): 71-80.
YU Hong, LIANG Chen, WU Tonghua, et al. Protection optimization scheme of kilometer-level high-temperature superconducting lines [J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(7): 71-80.
- [16] 杨军, 张哲, 尹项根, 等. 高温超导电缆保护研究 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28(6): 17-21.
YANG Jun, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Protection for high temperature superconducting power cable [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(6): 17-21.
- [17] 范霄汉. 高温超导电缆失超对继电保护的影响研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
FAN Xiaohan. Research on the impact of HTSC quench on relay protection [D]. Beijing: North China Electric Power Uni-

- versity, 2014.
- [18] 彭吕斌, 胡博, 谢开贵, 等. 基于区间优化算法的电力系统可靠性评估逆问题模型[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(2): 169-177, 190.
PENG Lübin, HU Bo, XIE Kaigui, et al. Inverse problem model of power system reliability evaluation based on interval optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(2): 169-177, 190.
- [19] 许鹏程, 刘文霞, 陈启, 等. 基于重要抽样与极限学习机的大电网可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 204-210.
XU Pengcheng, LIU Wenxia, CHEN Qi, et al. Reliability evaluation of large power system based on combination of important sampling and extreme learning machine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 204-210.
- [20] 曾广璇, 余涛, 林丹, 等. 基于分布式馈线自动化的配电信息物理系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 57-68.
ZENG Guangxuan, YU Tao, LIN Dan, et al. Reliability assessment of cyber physical distribution system based on distributed feeder automation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 57-68.
- [21] STEMMLE M, MERSCHER F, NOE M, et al. Novel grid concepts for urban area power supply[J]. Physics Procedia, 2012, 36: 884-889.
- [22] 韦德福, 王飞鸣, 诸嘉慧, 等. 10 kV 磁偏置超导限流器限流阻抗特性实验研究[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(11): 114-119.
WEI Defu, WANG Feiming, ZHU Jiahui, et al. Experimental study on impedance characteristics of 10 kV magnetic biased superconducting current limiter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11): 114-119.
- [23] YAZDANI-ASRAMI M, SEYYEDBARZEGAR S, SADEGHI A, et al. High temperature superconducting cables and their performance against short circuit faults: current development, challenges, solutions, and future trends[J]. Superconductor Science and Technology, 2022, 35(8): 083002.

作者简介:

吕忠麟(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超导电缆在电力系统中的应用、电力系统优化规划(E-mail: lv811088558@sjtu.edu.cn);

顾洁(1971—), 女, 副教授, 博士, 通信作者, 主要研究方向为大数据与人工智能技术在电力系统中的应用、电力市场及电力系统优化规划(E-mail: gujie@sjtu.edu.cn);

金之俭(1965—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为智能电网技术、电力设备在线监测技术、超导应用技术(E-mail: zjjin@sjtu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Reliability evaluation method of distribution network with HTS cable considering cooling system and overheating protection

LÜ Zhonglin, GU Jie, JIN Zhijian

(Key Laboratory of Control of Power Transmission of Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to meet the requirements of commercial operation of high temperature superconducting (HTS) cable, a reliability evaluation method of distribution network with HTS cable is proposed, which considers the influence of cooling system and overheating protection in different application modes. According to the working principle and fault characteristics of HTS cable cooling system, and the action logic and automatic reclosing rules of overheat protection device, the reliability of HTS cable system is modeled and analyzed. Considering the influence of HTS cable access on the reliability of distribution network in two typical application modes of low-voltage tie-line connection and distribution efficiency improvement, the minimum cut set method integrated with the failure modes considering HTS cables is used to solve the reliability index of distribution system, then the reliability evaluation of distribution network including HTS cables is realized. Taking a practical distribution network as an example, the effects of cooling system fault and overheating protection on different reliability indexes of distribution network are analyzed by simulation, and compared with conventional construction plan, the effectiveness of the proposed method is verified.

Key words: HTS cable; distribution network; reliability evaluation; minimum cut set method; cooling system; overheating protection

附录 A

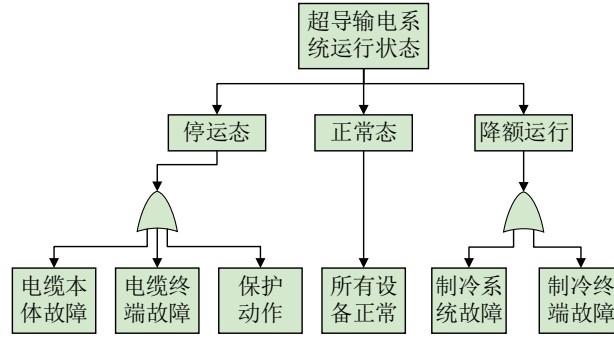


图 A1 超导电缆系统状态图

Fig.A1 Status diagram of HTS cable system

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{SAIFI,a} = I_{SAIFI,b} + \frac{\lambda_s n_s}{\sum n_i} \\ I_{SAIDI,a} = I_{SAIDI,b} + \frac{U_s n_s}{\sum n_i} \\ I_{SASAI,a} = I_{SASAI,b} - \frac{U_s n_s}{8760 \sum n_i} \\ I_{SENSI,a} = I_{SENSI,b} + \sum L_{a(s)} U_s \end{array} \right. \quad (A1)$$

式中： $I_{SAIFI,b}$ 、 $I_{SAIDI,b}$ 、 $I_{SASAI,b}$ 和 $I_{SENSI,b}$ 分别为叠加新故障模式前的 SAIFI、SAIDI 和 SASAI、SENSI 指标； $I_{SAIFI,a}$ 、 $I_{SAIDI,a}$ 、 $I_{SASAI,a}$ 和 $I_{SENSI,a}$ 分别为叠加新故障模式后的 SAIFI、SAIDI 和 SASAI、SENSI 指标； n_i 为系统各负荷点的用户数； λ_s 、 U_s 和 n_s 分别为新增故障模式的故障率、平均停电持续时间和停电用户数； $L_{a(s)}$ 为新增故障模式的停电负荷。

表 A1 部分负荷点的故障率

Table A1 Failure rate of some load points

负荷点	故障率/(次 a ⁻¹)			
	情况 1	情况 2	情况 3	情况 4
3	2.217×10 ⁻⁴	3.964×10 ⁻³	2.217×10 ⁻⁴	3.964×10 ⁻³
5	8.125×10 ⁻⁴	6.925×10 ⁻³	2.490×10 ⁻¹	2.551×10 ⁻¹
6	6.934×10 ⁻⁴	6.229×10 ⁻³	6.934×10 ⁻⁴	6.229×10 ⁻³
8	2.787×10 ⁻⁴	4.440×10 ⁻³	2.787×10 ⁻⁴	4.440×10 ⁻³

表 A2 部分负荷点的停电持续时间

Table A2 Interruption duration of some load points

负荷点	停电持续时间/(h 次 ⁻¹)			
	情况 1	情况 2	情况 3	情况 4
3	1.274×10 ⁻⁶	6.736×10 ⁻²	1.274×10 ⁻⁶	6.736×10 ⁻²
5	7.331×10 ⁻⁶	1.495×10 ⁻¹	1.041×10 ⁻³	1.505×10 ⁻¹
6	5.092×10 ⁻⁶	1.330×10 ⁻¹	5.092×10 ⁻⁶	1.330×10 ⁻¹
8	2.368×10 ⁻⁶	7.491×10 ⁻²	2.368×10 ⁻⁶	7.491×10 ⁻²