

# 超导电力装置失超检测的基础研究

喻小艳, 李敬东, 唐跃进

(华中科技大学超导电力科学技术研究中心, 武汉 430074)

**[摘要]** 超导电力装置的失超会影响超导电力设备的运行和安全, 是超导电力设备技术实用化有待深入研究的一个重要问题。对国内外通用的超导装置失超检测方法进行了分析, 并根据电力系统中超导装置失超检测的特点, 对高温超导线材在不同幅值的动态电流作用下的失超特性进行了试验研究, 通过对试验数据的分析, 对高温超导线材的失超特性有了较精细的理解, 并在此基础上提出了超导电力装置失超先兆检测及其失超保护设计的新概念。

**[关键词]** 超导装置; 失超检测; 超导电力系统; 先兆预测

**[中图分类号]** TM26<sup>+</sup>5; TM930.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)10-0073-05

## 1 引言

电力系统中的超导装置必将遇到诸如系统短路故障等各种动态过程, 承受短路大电流、不平衡电流的冲击, 以及由此而产生的电磁、机械应力、热量的作用。超导电力装置有可能因过大的短路电流或电磁机械应力的作用而失超。超导装置的失超, 不仅改变了超导电力设备的电气参数, 对超导电力系统的安全、稳定、经济运行也将产生一定的影响。对于超导装置自身, 若不采取措施将线圈中能量及时转移, 能量通过线圈以热能的形式耗散, 可能会烧毁磁体。因而解决高温超导电力装置失超问题具有重大的意义。

对现在通用的超导装置失超检测方法进行了分析。根据电力系统中超导装置承受冲击电流的特点以及失超保护的重要性, 对高温超导线材在不同幅值的动态电流作用下的失超特性进行了试验研究, 通过对试验数据的分析, 对高温超导线材的失超特性有了较精细的理解, 并在此基础上提出了超导电力装置失超先兆检测及其失超保护设计的新概念。

## 2 国内外磁体的失超检测研究现状

目前, 国内外采用的失超检测方法主要有温升检测<sup>[1]</sup>、压力检测<sup>[1]</sup>、超声波检测<sup>[2]</sup>、流速检测<sup>[3]</sup>和电压检测<sup>[4]</sup>。

其中, 温升检测测量导体温度变化; 压力检测测量低温容器内压力变化; 超声波检测测量超声波信号的输入和输出间传函的变化; 流速检测测量冷却介质流速的变化; 电压检测测量电阻电压分量的产生。其中应用最为广泛的是电压检测, 其余各种检测方法在实际应用中并不多见。这里主要介绍电压检测法。

最基本的电压检测方法为直接进行匝间电压检测。这种方法不仅可以检测出线圈中是否有失超发生, 还可以根据预先测得的不同区段失超时线圈端电压随时间的变化曲线, 确定出原始失超位置。这种方法的缺点是在每匝线圈上都需安装电压传感器, 而且, 当系统中存在电磁噪声时灵敏度不高。

桥式电路检测法是匝间电压检测法的改进。如图1所示, 在磁体线圈上安装中心抽头并分别与电阻  $r$  相并联。校正后, 未失超时通过电流表的电

**[收稿日期]** 2003-04-30; **[修回日期]** 2003-06-04

**[项目基金]** “八六三”高技术计划资助项目(2002AA306331)

**[作者简介]** 喻小艳(1978-), 女, 湖北公安县人, 华中科技大学硕士研究生

流为零。失超后，电桥不平衡，有电流流过电流表，故可通过电流表来判断失超是否发生。

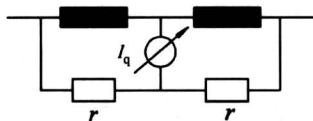


图1 桥式电路检测法

Fig.1 Typical quench detection voltage bridge circuit

桥式电路的误差应低于0.5%。它较之匝间电压检测要方便且易实现，不需要安装电压传感器。但是桥式电路同样存在噪声干扰的问题，而且，对于交流电路，外接电阻会消耗一部分能量。

图2所示的有源功率检测法可以很好地解决这些问题。它对交流和直流电路同样适用，且不受噪声的影响。

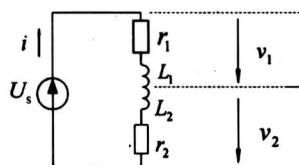


图2 有源功率检测法

Fig.2 A partial active power detecting method

图2中， $L_1 = L_2$ ，为两半绕组失超后产生的电阻。定义

$$P = (r_1 - r_2) i^2.$$

未失超时， $r_1$ 和 $r_2$ 均为零，故值也为零。失超后， $P = (r_1 - r_2) i^2$ ，即除了 $r_1 = r_2$ 的情况，失超均可通过 $P$ 值检测到。 $r_1 = r_2$ 是极其罕见的特殊情况，通常可不予考虑。

监测时， $P$ 的信号常伴有噪声，例如电磁噪声。可附加一个低通滤波器(LPF)以排除噪声干扰<sup>[5]</sup>。整个检测系统的原理框图见图3。

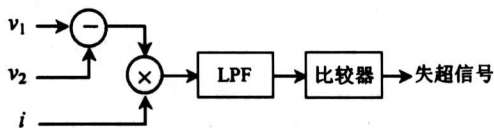


图3 改进后的有源功率检测法的原理框图

Fig.3 A block diagram of the quench detector

对于多个磁体的情况，应对电压差环节加以改进，通过多级运算放大器消除各段磁体间的自感和互感<sup>[6]</sup>。

### 3 线材失超特性

#### 3.1 试验方法

供试样品为Bi2223银包套带材，样品长度为10 cm。在图4所示的试验回路中，设定电压在某一直值上，从导通晶闸管获取一组试验数据。然后逐步提高电压设定值，即增大通电电流，重复试验。直至通电电流达到试样临界电流的4~5倍。这样的实验方案主要是为了模拟电力系统中可能出现的短路电流，为超导装置在系统短路的条件下承受过大短路电流的性能设计，提供基础数据。同时控制晶闸管的开通相位，以消除由于试验回路中的电感所产生的动态过程。控制晶闸管的开通时间为1~2个周期，以防止大电流烧损样品。

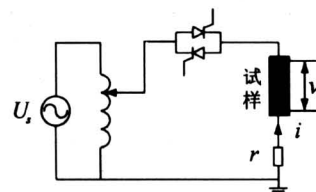


图4 实验示意图

Fig.4 Simplified schematic for the experiment

由于高温超导带材的常态电阻值较小，测量回路中的电感会造成测量误差。为消除这一误差，在保证试样不失超的低电压、小电流下测量电压、电流值，此时测量所得电压为电感电压。由

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

计算出测量回路的总电感 $L$ 。然后根据该电感对各次试验数据进行处理，消除其中的电压分量。

实际数据处理结果证明，当超导线材不失超时，经消除电感电压分量处理后，测量试样上的电压基本为零。

#### 3.2 数据处理和分析

在超导线材失超的情况下进行了17组实验，超导线材的电流、电压值如表1所示(均取最大值)。

对各组实验数据进行消除电感电压修正后，取前1/4周波的超导电流、电压采样值进行分析，以 $dv/dt > 1.0 \text{ V/s}$ 为判据确定失超起始点。经计算得出各组实验的初始失超电流 $i_c$ 均为77 A。由此可知，在电流峰值达线材临界电流的4~5倍范围内，过电流的大小对线材的临界失超电流没有明显的影响。

表 1 1—17 组实验中电流电压的最大值

Table 1 The measured value of current and voltage of group 1—17

组号	$I_{max}/A$	$U_{max}/V$	组号	$I_{max}/A$	$U_{max}/V$
1	87.2	0.005 9	10	192	0.99
2	92.7	0.006 2	11	205	1.20
3	110	0.027	12	229	1.61
4	119	0.069	13	252	2.09
5	127	0.13	14	273	2.53
6	136	0.21	15	295	2.96
7	150	0.37	16	340	3.98
8	165	0.56	17	381	5.11
9	180	0.77			

分别计算各组实验中各采样时刻的电阻值，作出  $r-t$  曲线，结果如图 5 所示。将 1, 2, 3 组实验的  $r-t$  曲线作局部放大，如图 6 所示。

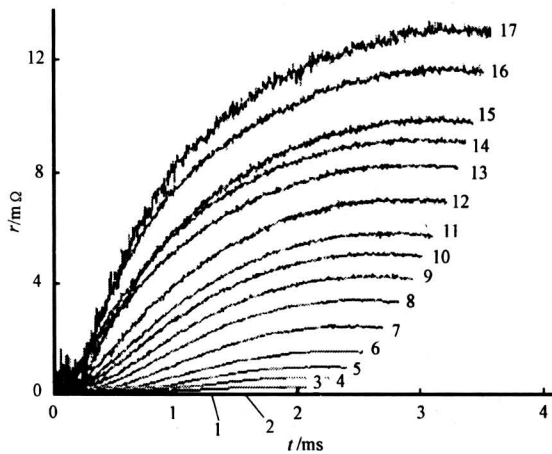


图 5 第 1—17 组实验的  $r-t$  关系图

Fig.5 The relation between  $r$  and  $t$  of group 1—17

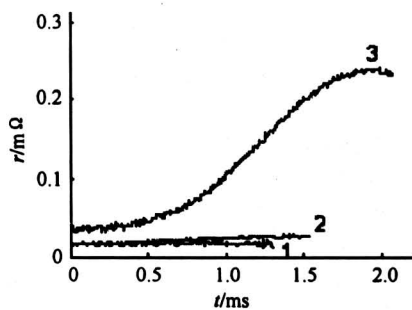


图 6 第 1—3 组实验的  $r-t$  关系图

Fig.6 The relation between  $r$  and  $t$  of group 1—3

进一步深入分析后发现，可将 1—17 组实验分为 3 大组，1, 2 组为 A 组，3—12 组为 B 组，13—17 组为 C 组。

在 B 组，失超电阻的变化可分为初始阶段、加速阶段和稳态阶段。在初始阶段里，失超电阻随着时间缓慢增大；在加速阶段里，失超电阻开始急剧上升；在稳态阶段里，失超电阻基本不变。以其中第 6 组实验为例，失超电阻与失超时间的关系如图 7 所示，时间的零点是失超的起点。

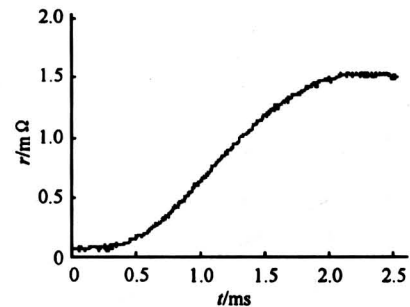


图 7 第 6 组实验的  $r-t$  关系图

Fig.7 The relation between  $r$  and  $t$  of group 6

从 B 组数据可以看出样品中常态区域的发展模式。显然，电阻呈现 3 段的模式与常态区域的热量与样品周边的液氮的冷却因子相关。对此，尚需进一步进行分析。

对于 A 组， $r, dr/dt$  均很小，失超电阻的发展进程在初始阶段即已停止，可以认为失超仅在样品的局部发生。以第 2 组实验为例，失超电阻与失超时间的关系如图 8 所示。在 C 组实验中，失超不经过初始阶段，直接从加速阶段开始。以第 13 组实验为例，失超电阻与失超时间的关系如图 9 所示。

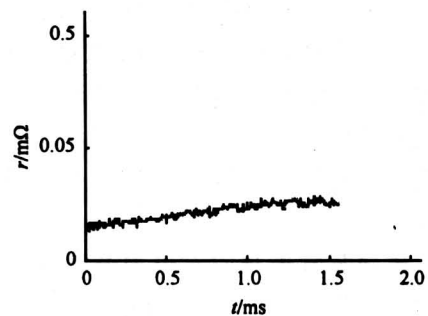


图 8 第 2 组实验的  $r-t$  关系图

Fig.8 The relation between  $r$  and  $t$  of group 2

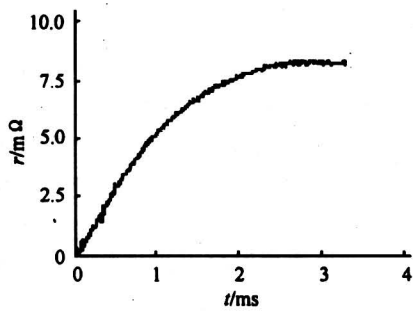


图9 第13组实验的  $r-t$  关系图

Fig.9 The relation between  $r$  and  $t$  of group 13

#### 4 失超先兆预测及系统保护方案

随着数字信号技术的发展和成熟,数字技术已开始应用于超导磁体的失超检测<sup>[7]</sup>,这大大有利于提高磁储能系统失超检测的速度。在温升检测、压力检测、流速检测和超声波检测等各种检测手段中,温度信号、压力信号、流速信号和超声波信号均需要经过一定的转换才能变为电信号。只有电压检测法检测的信号可直接应用于数字式失超保护系统中。另外,温升检测、压力检测和流速检测分别受到低温传感器、压敏传感器和流速传感器的性能的限制,其检测速度和检测可靠性都存在瓶颈,而且检测成本较高。超声波检测法由超声波性质决定了易受到声波的干扰引起误动。由于电力系统中超导装置失超检测的特殊性,常规失超检测已不能完全满足要求。

根据试验结果,对于A组和B组的情况,失超存在一个缓慢发展的初始阶段(可视为失超此时仅在局部发生),此时通过检测  $dv/dt$  或  $dr/dt$  可有效探测到失超的发生。这种对发生在局部的失超进行检测的失超先兆预测方法可进一步提高失超检测的反应速度,对高温超导线材的失超检测和保护是有重要意义的。以检测  $dv/dt$  或  $dr/dt$  为原理,以数字信号处理器为工具,做成一套失超实时检测系统,其反应速度可望远超国外现有失超检测系统。

由于超导装置失超时,对电力系统有重大的影响,在含超导装置的电力系统中,应从电力系统的动态特性出发,系统地考虑超导装置的失超保护(包括过电流保护)问题,根据对高温超导线材在不同幅值电流下的失超特性的分析,针对超导电力装置可以给出以下的保护设计原则:对于最大故障电流小于导线通流能力的小电流情况,可基本不加

失超保护装置;对于最大故障电流小于3倍导线通流能力的电流情况,可用所提出的先兆预测检测法及时检测到失超并加以保护;而对于大于导线通流能力3倍的故障电流(即C组的情况),失超过程发展迅速,几乎没有缓慢发展的初始过程,失超的及时检测相当困难,因此,在实际应用中,应该采取积极措施以防止大于导线通流能力3倍的故障电流通过超导装置。

#### 5 结语

针对超导电力系统中失超检测的特点和现有失超检测方法的不足,通过实验方法提出了检测  $dv/dt$  或  $dr/dt$  的失超检测方法,可以对在局部发生的失超进行失超先兆预测,这对高温超导线材的失超检测和保护以及超导电力技术的应用有着重要意义。在实际应用中,应该采取措施以防止大于导线通流能力3倍的故障电流通过超导装置,这个问题的解决还需进一步工作。

#### 参考文献

- [1] Loyd R J, Bule A M, Chang C L. Coil protection for the 20.4 MW · h SMES/ETM [J]. IEEE Trans magn, 1991, 27(2): 1716~1719
- [2] Ninomiya A, Sakaniwa K, Kado H, et al. Quench detection of superconducting magnets using ultrasonic wave [J]. IEEE trans magn, 1989, 25(2): 1520~1523
- [3] Sugimoto M, Iscono T, Koizumi N, et al. An evaluation of the inlet flow reduction for a cable in conduit conductor by rapid heating [J]. Cryogenics, 1999, 39(11): 939~945
- [4] Seeber B. Handbook of applied super-conductivity [M]. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1998. 527~555
- [5] Nanato N, Yanagishita M, Nakamura. Quench detection of bi-2223 HTS coil by partial active power detecting method [J]. IEEE Trans Appl Supercon, 2001, 11(1): 2391~2393
- [6] Pfothenauer M, Kessler F, Hilal M A. Voltage detection and magnet protection [J]. IEEE Trans Appl Supercon, 1993, 3(1): 273~276
- [7] Orris D F, Feher S, Lamm M J, et al. A digital quench detection system for superconducting magnets [A]. A Luccio, Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference [C]. Piscataway, New Jersey; IEEE, 1999. 3191~3193

## The Basic Study for Quench Detection in Superconducting Electric Equipments

Yu Xiaoyan, Li Jingdong, Tang Yuejin

(*Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

[**Abstract**] Quench of superconducting electric equipments is an important problem for superconducting electric power systems and will affect its operation. This paper presents the quench detection of SMES in power system operation, and puts forward forecast theory for quench detection.

[**Key words**] superconducting electric equipments; quench detection; superconducting electric power system; forecast theory

---

(cont. from p. 55)

## Engineering Experiment Research of the Quantity Theoretical Orthogonal Design Optimal Method for the Coal-seam Injection Parameters

Qin Shuyu<sup>1</sup>, Qin Weihai<sup>2</sup>

(1. *Department of Electronics and Information Engineering, Liaoning University of Technology, Fuxin, Liaoning 12300, China*; 2. *College of Mechanics and Electronics, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China*)

[**Abstract**] To apply the orthogonal design to the optimization of the coal-seam injection technical parameters' combination is a better method that realizes the best effect of injection for the coal-seam with steady geological conditions. But with this method, its effect cannot definitely satisfy the injection engineering requirement for the coal-seam with changing geological conditions. For this reason, in view of the coal-seam with unsteady geological factors and the characteristic that the geological factors have both qualitative and quantitative variables, one method that applies the quantity theory and orthogonal design to determine the optimal combination of injection technical parameters is raised and the engineering experimental study has been made. The experiments show that this method can save the quantity of injection experiment engineering and are approaching to the actual engineering requirement.

[**Key words**] quantity theory; technical parameter; orthogonal design; coal-seam injection; experimental study