

[储能系统]

传导式超导磁储能系统在实际应用中热稳定性问题研究

文/王祝露¹ 龚康² 唐燕¹ 王成³ 余喆¹

1. 国网浙江省电力有限公司衢州供电公司；2. 国网湖北省电力有限公司宜昌供电公司；3. 衢州光明电力设计有限公司

分析了超导磁储能系统的基本结构，针对超导磁体的交流损耗计算、磁体优化设计和失超保护等方面对超导磁储能系统的热稳定性问题的研究进展进行了分析，提出了考虑超导磁体运行工况的主动式优化控制思路，通过主动控制超导磁体的运行参数来控制超导磁体的温升，提高了超导磁储能系统在运行过程中的热稳定性。

储能装置能够灵活地与系统进行功率交换，在新能源并网、电力系统控制及用户侧响应等方面都有着广泛的应用。超导磁储能系统（Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES）具有快速的响应能力和较高的功率密度，是一种具有广阔前景的储能方式。

SMES的应用研究已经取得较多的成果，主要可以归纳为三个方面。

1) 用于解决新能源并网的可靠性问题。由于新能源固有的波动性、随机性，使得不管是通过大规模集成并网，还是通过微电网接入的分布式发电，都不得不考虑如何提高新能源发电稳定性的问题。SMES可以对新能源系统的功率波动进行平抑，而且由于SMES响应的快速性，更适合于处理时间尺度较短的功率波动。随着新能源电源占比的提高，电力系统面临着系统惯性降低、电力电子化等问题，SMES在改善系统惯性、增强系统可靠性上也有着重要作用。另外，SMES在风电的低电压穿越、改善微电网的频率特性等方面都有一定应用。

2) 用于解决传统配电网的稳定性问题。由于电力系统的规模不断扩大以及高增益的励磁系统的投入，电力系统的稳定问题十分突出。与传统的FACTS装置以及PSS不同，储能装置作为一个灵活

的功率源，可以直接参与调控电动机的阻尼转矩以及同步转矩，从而使系统迅速稳定。

3) 用于改善用户侧的供电质量和负荷特性。随着一些精密电子设备在生活中普及，人们对供电质量的要求越来越高；一些电力电子设备和大功率设备的应用，给配电网带来谐波污染以及功率冲击等一系列问题。SMES在用户侧可以用于改善供电质量，也可以用来减弱大型负荷对配电网的冲击。

SMES在电力的发、输、用环节都有着重要应用，可以说是一项十分具有应用前景的储能技术。然而SMES一直未能大规模商业应用，仍然还有许多技术问题有待解决。

SMES在运行的过程中存在热稳定性的问题。SMES在与系统进行功率交换的过程中，会因为超导磁体内磁场与电流的变化而产生交流损耗，热量积累会破坏超导磁体的热稳定性，使超导磁体有失超的危险。一方面，超导磁体的交流损耗主要由超导磁体的功率交换造成，然而SMES的工况复杂，难以在考虑所有工况基础上进行制冷设计；另一方面，受当前制冷技术的限制，SMES可选的经济的制冷方式有限。这两方面的原因使得目前SMES在运行过程中的热稳定性难以保证。此前，有很多研究者致力于超导磁体热稳定性的研究，包括交流损

耗的精确测量、交流损耗的准确计算、超导磁体的导冷优化设计以及考虑交流损耗的磁体结构优化等，但是这些方法考虑更多的是从超导磁体本身入手，无法从根本上控制超导磁体的交流损耗。

SMES的基本结构

SMES的一般结构如图1所示，由超导磁体、功率调节系统、低温系统、功率控制系统及失超保护系统几个部分组成。

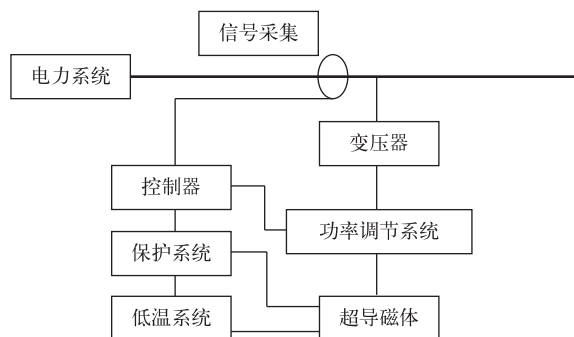


图1 SMES的基本结构

超导磁体是SMES储存能量的核心，以电感储能原理将电能以电磁能的形式储存在超导磁体中。超导材料在通过直流时没有焦耳损耗，而且载流能力要比常规导线高出10~100倍，因而SMES能够稳定、高密度地储存电能。另外，由于SMES是以电磁能的形式储存电能，不需要转化为其他形式的能量，故SMES的能量转换效率高，响应速度快，功率密度更大。但是，超导材料的特性使得超导磁体的设计与使用不同于常规磁体，超导体的临界特性如图2所示。超导材料具有临界温度、临界电流和临界磁场三个临界值，超导磁体的温度、电流及磁场必须处在图2所示的1/8球面中时，超导磁体才能在超导态下工作，一旦有一个参数超过了对应的临界值，超导磁体将会迅速失超。而超导磁体在功率交换时，其电流和磁场会不断变化，超导磁体因此产生交流损耗，这些热量使超导磁体的温度上升，温度的上升进一步影响超导磁体的载流能力，从而使超导磁体的交流损耗更加剧烈，当温度上升到一定的程度时，超导磁体就会失超。因此，超导磁体的设计与运行都需要综合地考虑超导磁体的电磁热三个方面的特性，使得超导磁体相比于常规导体显得更加“脆弱”，其可靠性也一直为研究

者们所担心。

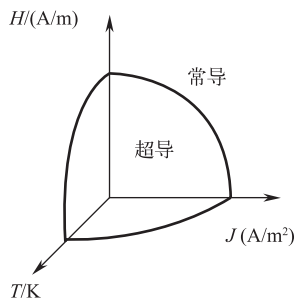


图2 超导体的临界特性

功率调节系统是连接超导磁体与电力系统的桥梁，一方面变流器要完成超导磁体直流电流到电力系统三相交流的变换；另一方面，还需要根据指令来调控超导磁体吸收或释放功率的大小。目前，SMES一般采用基于全控开关器件的PWM变流器，能够实现有功功率与无功功率的快速、独立控制，使得SMES不仅能够为电力系统提供有功功率，还能灵活地补充或消纳无功功率，成为一种新型的且功能更为强大的FACTS装置。

低温系统是使超导磁体处于所必须的低温环境的关键。就目前的高温超导体而言，超导材料仍然需要在90 K以下的低温环境中才能维持其超导特性。另外，超导磁体的载流能力与承受磁场的能力会随着温度的下降而提升，为了充分利用超导带材，一般会让超导磁体工作在更低的温度下来获得更高的载流能力，这就需要沸点更低的冷却介质及制冷功率更高的制冷系统。

失超保护系统主要用于对超导磁体自身进行保护，采集超导磁体的电流、电压、磁场及温度等数据，对超导磁体是否失超或是否将要失超作出判断，并在超导磁体将要失超或者已经失超时，启动超导磁体的释能开关，将超导磁体储存的能量迅速释放掉，避免超导磁体因为失超而损毁，这时SMES将退出运行。

功率控制系统相当于SMES的“眼睛”与“大脑”，可以采集电网的信号并进行分析，判断SMES需要交换的有功和无功功率，并将这一功率指令传达到变流器。

超导磁储能系统热稳定性的研究

高温超导材料的出现让超导磁体摆脱了昂贵的

液氮浸泡制冷的限制,大量的基于传导式冷却超导设备被研制出来,使用传导式冷却显著缩减了超导设备的制冷成本。基于制冷机的超导磁体可以工作在20 K左右的温区,此时高温超导带材仍然保持着较强的载流能力与磁场承受能力。但是传导式冷却也让超导设备的热稳定性问题愈发突出,制冷机制冷功率的限制和磁体内导冷通道的限制使得超导磁体内的热量不能像浸泡式冷却那样被迅速地传递出去,容易在远离制冷机冷头的部位造成局部温升,一旦超导磁体的这部分失超,就会迅速在超导磁体内扩散。因此有很多研究者投入到了对SMES热稳定性的研究中。

1. 超导磁体交流损耗计算与测量

超导磁体的交流损耗是引起超导磁体温升的主要原因,因此,为了研究超导磁体的热稳定特性,首先必须要能够准确地计算超导磁体的交流损耗。提出能够描述超导材料内部磁场与电流关系的模型,也就是超导体临界态模型,被研究者们广为采纳的是Bean模型、Kim模型和E-J_c指数模型。选择合适的模型,结合法拉第定律和安培定律就能迭代求解超导带的交流损耗,但是这种算法花费时间较长,Oomen在简化前任公式的基础上,给出了计算超导磁体交流损耗的经验公式。至于超导磁体交流损耗的测量,主要是电测法、热测法和磁测法。考虑到热测法对测量条件的要求较高,目前应用较多的是电测法。

2. 超导磁体结构优化、导冷结构优化和工艺优化

超导磁体交流损耗产生的根本原因是电流变化引起的磁场变化,因此可以通过改变超导磁体的结构来优化超导磁体的磁场分布,从而减小超导磁体的交流损耗。

3. 超导磁体的失超保护

超导磁体的失超保护是超导磁体运行过程中的最后保障,必须在磁体即将失超前将超导磁体切除,因此,采用合理的失超判据是失超保护的关键。目前普遍采用的是温度判据和磁体电压判据。而温度判据存在反应滞后的问题,电压判据存在可靠性问题,需要寻找能提前预先反映超导磁体失超的趋势的判据。

基于超导磁体温升特性的主动优化控制

目前,主要提升超导磁体热稳定性的研究思

路在于提升SMES承受极限工况的能力。然而,超导磁体的应用场合较多、工况较为复杂,而且受制于超导材料本身特性以及有限的制冷方式,难以得到提高超导磁体热稳定性的经济方案。因此,本文提出了基于超导磁体温升控制的辅助控制方案。

该辅助控制的思路是根据超导磁体的实时状态(温度、磁体电流等)来管理SMES的功率交换,限制超导磁体的温升。热稳定性的研究要结合具体的工况,不同的工况(磁体电流、电流变化量及磁体温度)下,磁体产生的交流损耗不同,温升速度不同,因此需要研究超导磁体在不同工况下的温升特性,然后根据这些温升特性对超导磁体的工况进行控制,避免超导磁体退出运行的可能性,改善超导磁体的可靠性。

结束语

本文研究了SMES在运行过程中的热稳定性问题,在分析SMES结构特点的基础上,研究了目前超导磁体热稳定性的研究情况。目前,超导磁体热稳定性的研究集中在交流损耗、磁体优化设计与失超保护等几个方面,但是都受制于超导磁体本身的特性以及制冷方式。研究SMES考虑磁体温升的优化控制能在现有磁体的热特性上改善其在运行时的热稳定性,是一项有意义的研究。EA

(收稿日期:2022-05-19)

参考文献

- [1] WANG S, TANG Y, SHI J, et al. Design and advanced control strategies of a hybrid energy storage system for the grid integration of wind power generations[J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(2): 89-98.
- [2] WANG L, YU J Y, CHEN Y T. Dynamic stability improvement of an integrated offshore wind and marine-current farm using a flywheel energy-storage system[J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(5): 387-396.
- [3] 李刚,程时杰,文劲宇,等.基于储能型稳控装置的电力系统阻尼特性分析[J].电力系统自动化,2007,31(17): 11-15.