

# 500kW 高温超导发电机负载三相断路故障运行分析

梁 爽<sup>1,2,3</sup>, 张 东<sup>1,2,3</sup>, 陈 彪<sup>1</sup>, 李秋君<sup>1,2,3</sup>, 张路明<sup>4</sup>,  
宋乃浩<sup>1,3</sup>, 周微微<sup>1,3</sup>, 靖立伟<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 中国科学院应用超导重点实验室, 北京 100190;  
4. 上海电气集团上海电机厂有限公司, 上海 200240)

**摘要:** 随着高温超导材料制备技术及低温制冷技术的不断发展, 高温超导技术在电机方面展现出良好的应用前景。高温超导发电机由于其体积小、重量轻、效率高的优点, 未来有望应用于高功率密度场合。目前对于超导电机故障运行的研究极少, 本文对高温超导发电机进行了负载三相断路故障模拟仿真及现场实验, 得到故障过程中定子输出电压、转矩等变化的仿真及实验数据, 并在此基础上分析了超导线圈的电流变化, 及故障对电机机械结构的危害。本文可为超导发电机故障状态的瞬态过程分析提供数据支撑。

**关键词:** 高温超导; 发电机; 故障分析; 实验; 理论仿真

**DOI:** 10.12067/ATEEE1803086      **文章编号:** 1003-3076(2019)01-0076-06      **中图分类号:** TM26

## 1 引言

超导发电机具有低损耗、体积小、大功率和高转矩等优势<sup>[1]</sup>, 在发电机体积和重量严重影响整体成本与性能的船舶方面, 尤其是在军舰及潜艇上具有极大的应用前景<sup>[2]</sup>。国防军工、航空航天以及新能源工业的发展对发电机技术提出了更高容量和更大功率密度的需求, 大功率高温超导发电机由于其显著优点, 有望未来应用于船舶发电机、航空飞行器发电机和海上风力发电机等大容量高功率密度发电机应用场合<sup>[3]</sup>。

高温超导发电机的故障类型主要包括电机本体机械故障、绝缘故障、电网故障等, 目前已有针对高温超导发电机故障的运行分析及高温超导线圈瞬态过电流实验过程的一些研究。

H. Arsalan 和 A. Mehdi 的研究利用二维时间步进有限元方法分析了转子在高温超导同步发电机定子绕组短路故障条件下的性能, 研究了高温超导同步发电机转子在不同短路故障状态下的磁场分

布<sup>[4]</sup>。该团队通过 2-D 瞬态有限元分析对发电机对地故障的涡流分布进行了研究, 研究指出接地故障中励磁绕组的高温超导材料在短路故障时产生焦耳热损耗, 从而增加了高温超导材料的不稳定概率<sup>[5]</sup>。C. Yon-Do 等研究人员利用 d-q 轴等效电路模型对 10MW 高温超导同步风力发电机电磁暂态进行研究, 分析发电机定子端突然短路故障下的性能, 发现其瞬态短路电流高达额定电流的 7 倍, 场电流的振幅从 150A 上升到 230A, 然后在很短的时间内返回到正常的情况<sup>[6]</sup>。K. Sivasubramaniam 等研究人员开发了一种高温超导线圈的设计方案, 具有足够的余量运行在瞬态过电流。在故障期间, 运行场电流增加 18%, 线圈将无法从这样的故障恢复。故障清除后, 该励磁线圈不再是超导线圈, 也不能正常工作<sup>[7]</sup>。

在发电机众多故障种类中, “飞车”故障是严重的发电机故障之一。“飞车”故障中, 发电机转速突然升高, 超过转子动平衡限制, 造成转子剧烈震动, 从而故障也会严重破坏定子结构, 基本无法完全修

**收稿日期:** 2018-03-27  
**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51477168)  
**作者简介:** 梁 爽(1993-), 女, 河北籍, 硕士研究生, 研究方向为高温超导电力应用技术;  
张 东(1977-), 男, 黑龙江籍, 副研究员, 硕导, 研究方向为高温超导电力应用。

复。故障产生原因大多为甩负荷,发电机组运行过程中突然卸掉全部或部分负荷,即负载突发断路故障。发电机转矩的突增,是负载突发断路故障对发电机威胁极大的原因之一。同时对于高温超导发电机而言,转子线圈为高温超导材料,则转子电流在故障过程中失超,维修成本极其高昂。

由于实验成本、实验条件等原因,高温超导发电机故障运行分析方面的研究目前还不够成熟,研究进展缓慢,尤其关于高温超导发电机负载故障运行的研究极少,而故障对于电机本身具有巨大的威胁。发电机故障停机会造成重大的经济损失,对于高温超导发电机,还会引发超导带材出现失超甚至冲击分层,导致带材产生不可逆损伤。因此,本研究对高温超导发电机运行状态以及故障特性的分析具有重要价值。

结合电机仿真及现场测试运行过程中的实验数据,本文主要针对 500kW 高温超导发电机的负载突发断路故障过程开展研究,进行了负载三相断路故障模拟仿真及现场实验,得到故障过程中定子输出电压、定子电流、转速及转子电流等仿真数据及实验数据,并在此基础上分析了对超导线圈的性能影响,及故障对发电机机械结构的危害,为超导发电机故障状态,尤其对于转子线圈过电流的瞬态过程,提供了数据支撑。

## 2 理论分析

发电机运行时,定子输出电流和转子线圈励磁电流是主要监测的两个物理量。定子输出电流牵涉到定子线圈热稳定性及输出电压稳定性,励磁电流则关系着高温超导发电机转子使用的第二代 YBCO 带材能否处于超导态,同时二者也与功率因数超前或滞后以及电机整体运行的稳定性相关。

负载突发断路故障造成高温超导发电机定子输出侧断路,定子输出电流由额定电流突降为零。通过公式推导,理论上分析转子高温超导励磁电流与定子输出电流的关系,从而考量负载突发断路故障对转子线圈励磁电流的影响。

对同步电机进行理论推导<sup>[8-11]</sup>,经过参数折合后,电机的方程可以简化为:

磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + M_{afd0} i_{fd} + M_{aDd0} i_{Dd} \\ \psi_q = L_q i_q + M_{aDq0} i_{Dq} \end{cases} \quad (1)$$

电磁转矩为:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (2)$$

式中,  $T_{em}$  为电磁转矩;  $\psi_d$ 、 $\psi_q$  为 d、q 轴磁链;  $L_d$ 、 $L_q$  为 d、q 轴自感系数;  $M_{afd0}$  为 a 相轴线与 d、q 轴的阻尼绕组互感系数;  $M_{aDd0}$ 、 $M_{aDq0}$  分别为  $D_d$ 、 $D_q$  轴线重合时 a 相轴线与 d、q 轴的阻尼绕组互感系数;  $i_{fd}$  为励磁转子电流;  $i_{Dd}$ 、 $i_{Dq}$  分别为 d、q 轴阻尼绕组电流;  $i_d$  为定子 d 轴电流;  $i_q$  为定子电流;  $p$  为极对数。则有:

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{2} p [(L_d i_d + M_{afd0} i_{fd} + M_{aDd0} i_{Dd}) i_q - \\ &\quad (L_q i_q + M_{aDq0} i_{Dq}) i_d] \\ &= \frac{3}{2} p [i_d i_q (L_d - L_q) + i_{Dd} i_q M_{aDd0} - \\ &\quad i_{Dq} i_d M_{aDq0} + M_{afd0} i_{fd} i_q] \end{aligned} \quad (3)$$

转子磁场定向控制,令定子电流时刻与 d 轴磁链垂直,则有  $i_d = 0$ ,  $i_q$  为定子电流,同时令  $i_{Dd}$ ,  $i_{Dq} = 0$ , 则有:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p M_{afd0} i_{fd} i_q \quad (4)$$

通过公式推导可以得到,在发电机电磁转矩未发生突变情况下,定子电流与转子电流成反比关系;在负载突发断路故障时,输出转矩逐渐增大,转速随之增大,定子电流大小瞬间减小至零,则转子电流急剧增大。

虽然超导体能够无阻载流,但是承载无阻载流的能力是有限的。随着电流的增加,超导体也将在临界电流值以上失去超导电性<sup>[12-14]</sup>。所以,转子电流的增大,对于转子线圈的 YBCO 超导带材的正常工作有很大影响,可能会超过临界电流,使带材失超,由于目前超导带材制作工艺的原因,甚至造成物理分层,对其产生不可逆转的损伤。

## 3 研究对象

本文研究对象是转子使用第二代高温超导材料——YBCO 带材的高温超导线圈、冷铁心结构,定子为常规定子的高温超导发电机,对其进行了负载突发断路故障仿真与现场实验研究及结果分析。该电机采用驱动电机以发电机方式运行,额定功率为 500kW,额定转速为 1500r/min,频率为 50Hz。基本参数见表 1。

表 1 发电机基本参数表	
Tab. 1 Essential parameters of generator	
参数	数值
额定功率/kW	500
输出电压/V	690
功率因数	>0.98
转子材料	YBCO 带材
励磁电流/A	30
超导励磁绕组运行温区/K	77
单个双饼匝数	146
每极双饼数	3
转子每极磁动势/(A·t)	13140

4 研究过程及结果分析

4.1 仿真过程及结果分析

本研究在 500kW 高温超导发电机电磁设计模型基础上,通过仿真平台分别进行正常模拟运行测试及负载突发断路故障运行仿真。

4.1.1 正常工况仿真

正常工况仿真结果如图 1 所示。可以看出,发电机额定相电流幅值为 600A。除启动初期的 5ms 内运行不稳定,定子运行电流幅值偏小外,整体电流趋于平稳。在误差允许范围内,与电机设计参数吻合。

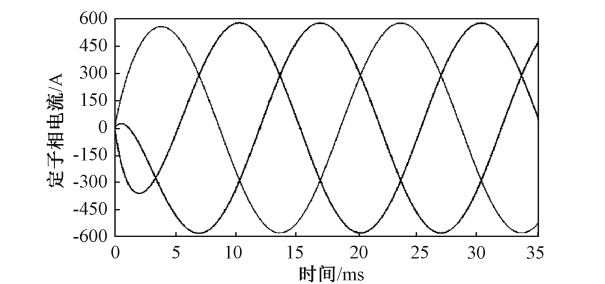


图 1 正常工况下定子相电流仿真波形图  
Fig. 1 Stator phase current waveform diagram of normal operating condition simulation

4.1.2 负载三相断路仿真

模拟负载三相断路故障过程外电路原理图如图 2 所示。由 0ms 开始电机稳定运行,为避免出现运行初期电流不稳定的情况发生从而影响结果,设置故障发生时间为 50ms 处,此时,在发电机外电路三相负载添加的定时断路开关断开,模拟电机运行时负载突发断路,瞬间由额定负载运行变为空载运行,其他仿真条件不变。转矩变化如图 3 所示。发电机输出转矩突然增大 95.6%,之后 100ms 逐渐趋于平稳。

定子电流变化如图 4 所示。可以看出,电流最

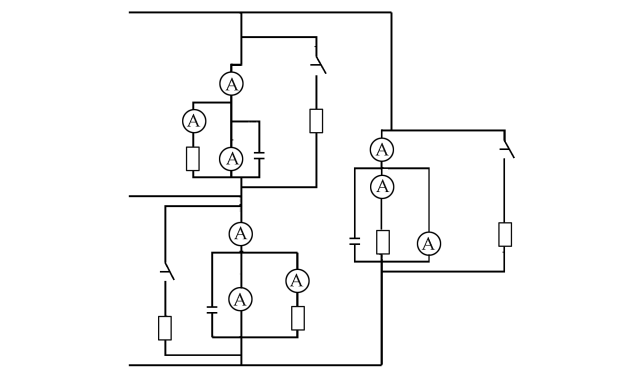


图 2 三相负载突发断路仿真外电路  
Fig. 2 Outer circuit of three-phase load breaking fault simulation

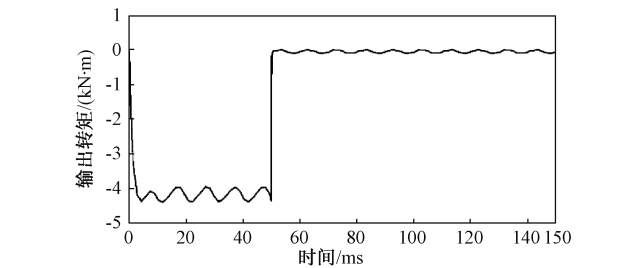


图 3 模拟负载突发断路过程中输出转矩变化图  
Fig. 3 Output torque waveform diagram of load breaking fault simulation

大值突降为零。根据理论分析,故障发生时,转矩缓慢增大,定子电流与转子电流在短时间内成反比,定子电流的减小使转子电流急剧增大,超出临界电流会引起高温超导材料失超。

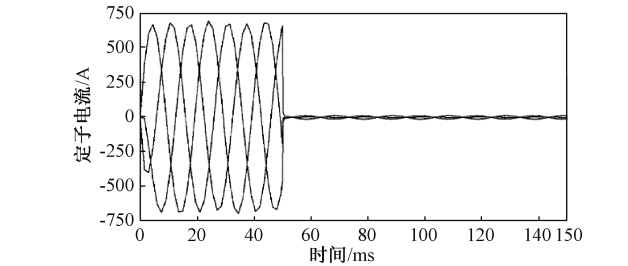


图 4 模拟负载突发断路过程中定子电流变化图  
Fig. 4 Stator current waveform diagram of load breaking fault simulation

4.2 现场实验过程及结果分析

2017 年 3 月,研究团队对采用第二代高温超导材料作为转子线圈的 500kW 高温超导发电机进行了满负荷运行实验。实验过程中突发负载三相断路故障,产生“飞车”现象,发电机本体产生震动及异响,迅速采取断开励磁电源措施避免了损失的发生,

同时得到了详细的故障实验数据,本文将对该负载断路故障过程进行分析研究。

图 5 为现场实验平台,包括发电机本体、驱动电机、为发电机提供励磁电流的直流电源、测试系统和为发电机转子线圈提供制冷条件的液氮等。

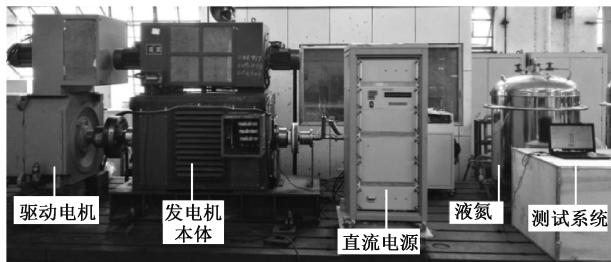


图 5 500kW 高温超导发电机实验平台  
Fig. 5 500kW HTS generator test platform

系统实验平台的搭建如图 6 所示。大功率远距离无线模块 E05-MLE132 进行转子线圈电压-温度-液位状态数据的无线数据传输。YBCO 线圈通过滑环与安装在发电机端部轴上的控制板连接,通过无线模块将实验数据传送到实时接收数据的接收模块并在电脑上处理,实时监测并记录超导发电机 12 个 YBCO 线圈的电压、温度及液位,以保证发电机的稳定运行。平台另一部分包括 Keithley2000 表、2182 纳伏表、2001 表及 10 通道扫描卡,通过连接滑环上转子线圈分流线实时采集各个转子线圈电流电压值及其和值,同时便于对突发实验状况迅速响应,采取保护措施以减小损失。定子输出端连接负载,同时由 NORMA5000 功率分析仪记录输出电压电流及转速等数据。

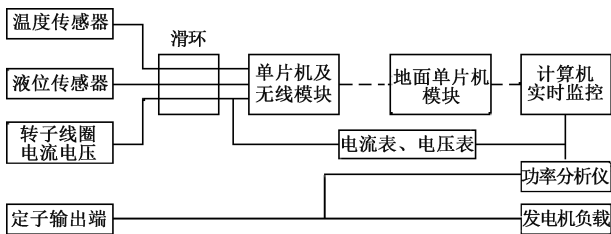


图 6 系统实验平台示意图  
Fig. 6 Diagram of system test platform

500kW 高温超导发电机三相负载突发断路故障发生于发电机以额定功率及额定转速运行过程中,额定负载突发断路,即三相额定负载突然完全断开,发电机本体其他参数及运行环境不变。实验过程中,LABVIEW 实验平台约每 2s 记录一次线圈电压有效值、电流有效值及谐波量、转速值。以下为现

场实验结果及数据分析。  
实验中定子电流变化如图 7 所示。在 A 点,即  $t=88\text{s}$ ,突发断路故障时定子输出电流有效值突然降为零。

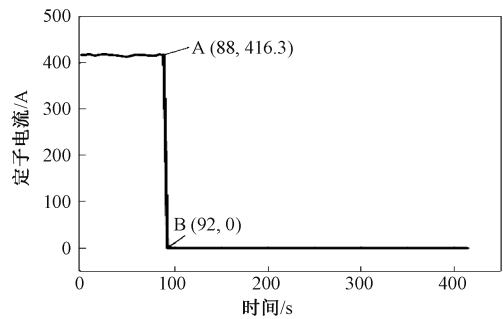


图 7 负载突发断路实验过程中定子电流变化图  
Fig. 7 Stator current waveform diagram of load breaking fault process

定子电流随着故障的发生而突然降为零,主要原因是在故障发生时定子处于断路状态,不会形成回路。根据理论分析结果,定子电流降为零会引起转子电流增大,从而使高温超导材料线圈失超。为保护转子超导线圈不受电流冲击造成失超或其他不可逆损坏,立即切断励磁电流。

实验中定子电压变化如图 8 所示。实验在  $t=88\text{s}$  时发生负载断路故障,定子线圈电压有效值突增 35%,之后逐渐减小,至 B 点,即  $t=94\text{s}$  时励磁直流电源突然断电,线圈内的剩磁造成了发电机定子电压在降到最低后有明显的回升,随后电压降至最低。

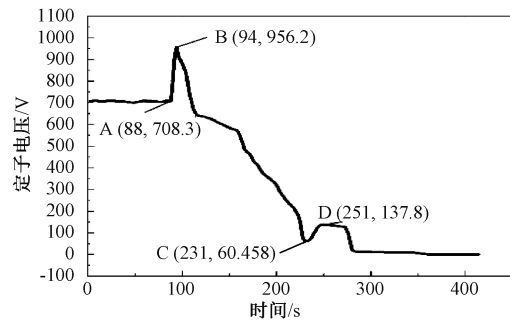


图 8 负载突发断路故障过程中定子电压变化图  
Fig. 8 Stator voltage waveform diagram of load breaking fault process

实验过程中,发电机转速在突发故障时由 A 点额定转速 1500r/min 突然增至 B 点(转速为 1865r/min),增加 24.3%,转速随时间变化如图 9 所示。根据仿真结果,发电机负载突然断路,输出转矩突然



增大,导致电机转速突然升高,与仿真结果一致。突然增加的转速导致发电机动态不平衡,产生震动并发出异响。

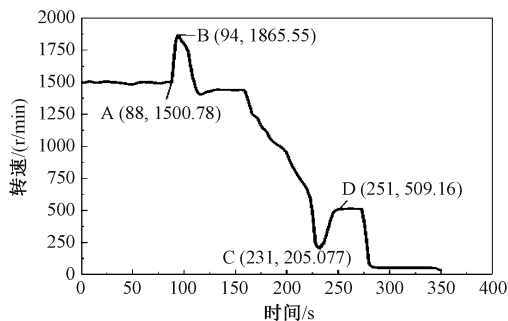


图9 负载突发断路过程中转速变化图

Fig. 9 Speed waveform diagram of load breaking fault process

实验中转子电流变化如图 10 所示。在 0~88s 过程中,发电机转子励磁电流由直流励磁电源控制,正在逐步升高至 29A 并保持不变。在 88s 时故障发生,直流电源输出电流为 29A 不变,转子电流升高了 0.5%,随后迅速切断直流电源,转子电流随之变为零。该实验结果表明,在负载突发断路故障时,定子电流突降为零,转子电流有明显升高趋势,与理论分析一致。转子电流与定子电流短时间内成反比,定子电流的减小使转子电流增大,若无切断直流电源措施,超导线圈有失超的风险,会造成高温超导发电机的巨大损失。

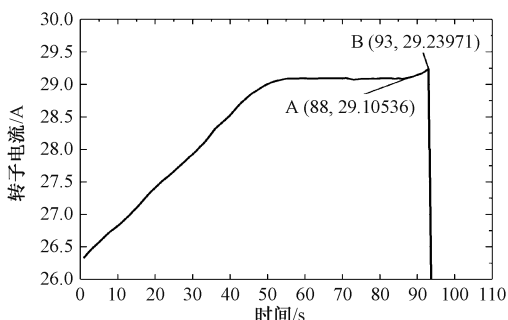


图10 负载突发断路过程中转子电流变化图

Fig. 10 Rotor current waveform diagram of load breaking fault process

## 5 结论

本文研究 500kW 高温超导发电机负载三相断路故障过程,由仿真和实验结果,得到以下结论:

(1)负载三相断路故障仿真结果表明,电机输出转矩 20ms 内增大了 95.6%,之后 100ms 逐渐趋

于平稳。仿真结果显示,定子电流最大值瞬间降为零。根据理论分析,故障发生时,转矩缓慢增大,定子电流与转子电流在短时间内成反比,定子电流的突降使转子电流增大,超出临界电流会引起高温超导材料失超,发生不可逆转的损伤。

(2)现场实验结果表明,定子输出电压 3s 内增大 35%,故障造成发电机转速 4s 内增加 24.3%,且转子电流增大了 0.5%,并有增大趋势,会造成超导线圈失超,与理论分析及仿真结果一致。发电机转矩的突增、转速的增大,使转子转轴突然受力不均,超过其动平衡限制,产生剧烈震动及异响。

由于超导电机的转子部分在工作状态下需要始终处于液氮环境下,电机急停会使液氮不流动,造成转子结霜,对接下来的工作造成影响,所以应在开始工作前检查电机与负载的连接以及负载是否工作正常,严格避免负载三相断路故障的发生。负载三相故障发生后,应降低电机转速但转速不能为零,励磁电流逐步降为零,进行故障排除。

## 参考文献 (References):

- [1] 徐喆,夏东,丘明,等 (Xu Zhe, Xia Dong, Qiu Ming, et al.). 转子内具有钇钡铜氧块材的超导磁阻电动机的研究 (Research of HTS reluctance motor with YBCO bulk materials in rotor) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2005, 25 (8): 139-144.
- [2] 赵佳,张威,方进,等 (Zhao Jia, Zhang Wei, Fang Jin, et al.). 结构参数对高温超导直线感应电机电磁性能的影响 (Influence of structural parameters on electromagnetic properties of high temperature superconductor linear induction motor) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2011, 31 (3): 97-103.
- [3] 林良真,肖立业 (Lin Liangzhen, Xiao Liye). 超导电力技术新进展及其未来发展的思考 (Recent advance and future in development of high temperature superconducting power technology) [J]. 物理 (Physics), 2006, 35 (6): 491-496.
- [4] Jo H C, Lee W S, Chung Y D, et al. Numerical analysis and design of damper layer for MW-class HTS synchronous wind turbine generator [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 24 (3): 1-5.
- [5] Hekmati A, Aliahmadi M. Double-layer rotor magnetic shield performance analysis in high temperature superconducting synchronous generators under short circuit fault conditions [J]. Cryogenics, 2016, 80: 147-153.
- [6] Chun Yon-Do, Kim Youn-Hyun, Kim Sol, et al. Transi-

- ent analysis of superconducting generator under the three phases of sudden grounding fault condition [J]. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 2002, 372-376; 1546-1550.
- [7] Sivasubramaniam K, Huang X, Laskaris E T, et al. Performance of an HTS generator field coil under system fault conditions [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2006, 16 (4): 1971-1975.
- [8] 汤蕴璆 (Tang Yunqiu). 电机内的电磁场 (Electromagnetic field in electrical machines) [M]. 北京: 科学出版社 (Beijing: Science Press), 1998.
- [9] 沈标正 (Shen Biaozheng). 电机故障诊断技术 (Motors fault diagnosis technology) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 1996.
- [10] 李发海, 王岩 (Li Fahai, Wang Yan). 电机与拖动基础 (Basic electrical machines and drives) [M]. 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 2012.
- [11] 胡敏强, 黄学良 (Hu Minqiang, Huang Xueliang). 电机运行性能数值计算方法及其应用 (Numerical computation method of electric machine performance and its application) [M]. 南京: 东南大学出版社 (Nanjing: Southeast University Press), 2003.
- [12] 王银顺 (Wang Yinshun). 超导电力技术基础 (Basic technology of superconducting electricity) [M]. 北京: 科学出版社 (Beijing: Science Press), 2011.
- [13] 彭伟, 赵峰, 王永兴, 等 (Peng Wei, Zhao Feng, Wang Yongxing, et al.). 永磁同步电机匝间短路故障在线检测方法 (On line detection method for inter turn short circuit fault of PMSM) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (3): 41-48.
- [14] 石晶, 张立晖, 徐颖, 等 (Shi Jing, Zhang Lihui, Xu Ying, et al.). 超导电力装置规模化应用中的基础性理论和技术课题 (Fundamental theoretical and technical topics for large scale application of superconducting devices in power systems) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (10): 63-68.

## Three-phase load breaking fault analysis of 500kW high-temperature superconducting generator

LIANG Shuang<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Dong<sup>1,2,3</sup>, CHEN Biao<sup>1</sup>, LI Qiu-jun<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Lu-ming<sup>4</sup>,  
SONG Nai-hao<sup>1,3</sup>, ZHOU Wei-wei<sup>1,3</sup>, JING Li-wei<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Applied Superconductivity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

4. Shanghai Motor Factory Co. Ltd., Shanghai Electric Group, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** With the further development of high temperature superconducting (HTS) material and cryogenic technology, high temperature superconducting technology application has a broad prospect for electrical machines. Because of their advantages, such as small size, light weight and high efficiency, HTS motors are promising for high power density applications in the future. However there is little research focusing on fault condition of HTS motors at present. In this paper the simulations and the field tests of the three-phase load breaking fault condition are studied to obtain the change of the output voltage and the torque of the stator. Based on the results, the superconducting coil current on the magnetic circuit are analyzed, which provides the data support for further study on transient process.

**Key words:** HTS; generator; fault analysis; test; theoretical simulation