

# 旋转超导电机发展现状<sup>\*</sup>

王玉彬

[中国石油大学(华东) 新能源学院, 山东 青岛 266580]

**摘要:** 大容量旋转超导电机在风力发电、舰船驱动等低速直驱应用领域具有广阔的应用前景。依据是否采用低温耦合传输装置实现低温冷却介质的传输和励磁功率的输入, 将旋转超导电机分为动态密封和静态密封超导电机两类。分析了动态密封超导电机的常用定子、转子结构形式及其优缺点。针对静态密封超导电机, 以转子分段式磁通切换结构、场调制双定子结构、单体励磁分极式结构等典型拓扑为例, 揭示了其能够实现冷却系统静态密封形式的本质原因。最后, 对两类超导电机面临的超导励磁绕组失超这一共性问题进行了探讨, 从电机本体结构层面, 给出了静态密封超导电机抑制电枢反应磁场对超导线圈影响的策略和方法。

**关键词:** 超导电机; 动态密封; 静态密封; 失超

中图分类号: TM 303 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)02-0001-08

doi: 10.12177/emca.2019.163

## Development Status of Rotating Superconducting Motor<sup>\*</sup>

WANG Yubin

(College of New Energy, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** Large-capacity rotating superconducting (SC) motor has bright application prospects in low-speed direct-drive applications such as wind power generation and ship driving. SC motors are classified into rotating and stationary seal SC motors, depending on whether a cryogenic coupling transmission device is used to achieve the transmission of cryogenic medium and the input of excitation power. Stator and rotor configurations and their advantages and disadvantages of rotating seal SC motors are analyzed and summarized, respectively. For stationary seal SC motors, typical topologies such as segmented-rotor flux-switching motor, field-modulation double-stator motor and single-excitation pole-divided motor are used as examples to reveal the essential reason for achieving stationary seal of the cooling system. Finally, the common problems faced by these two types of SC motors are discussed. From the configuration level of the motor, the strategies and methods of suppressing the influence of the armature reaction magnetic field on the SC coil are given for the stationary seal SC motors.

**Key words:** superconducting motor; rotating seal; stationary seal; quench

## 0 引言

近年来, 高温超导(HTS)技术的迅速发展使高温超导材料在电机、飞轮储能、磁悬浮等领域得到了广泛而深入的研究<sup>[1-4]</sup>。已有数据表明, 在液氮冷却条件下, 高温超导块材的俘获磁场可达2.3 T(77 K), 远高于目前永磁体的磁场强度, 而

第二代高温超导Y系线材的临界电流密度也已经达到 $3 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>(77 K, 0 T)。这意味着用高温超导材料取代传统电机中的绕组或永磁体, 能够显著提高电机的功率密度, 降低电机重量, 减小电机体积。研究表明, 10 MW的普通永磁直驱风力发电机重达300 t, 直径超过10 m, 而同容量的超导电机重仅150 t, 直径小于5 m, 质量和体积均

收稿日期: 2019-12-17; 收到修改稿日期: 2019-12-31

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51777216; 51277183)

作者简介: 王玉彬(1974—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为特种电机的设计、分析与控制。

可降低 50% 以上<sup>[3]</sup>。因此,超导电机在风力发电及舰船驱动等低速直驱应用领域具有广阔的应用前景,受到了政府及业内专家的广泛关注。

就高温超导电机的技术层面而言,超导电机的研发与应用需要重点解决低温冷却系统稳定运行与电机结构的合理选择这两方面关键问题。鉴于对低温超导材料开发应用的技术积累,低温冷却系统技术日趋成熟,现阶段市面上已经可以购置商业化成品(如吉福德-麦克马洪循环制冷机)。关于超导电机结构的选择,欧美国家也进行了大量富有成效的研究工作。早在 2005 年,德国西门子公司已经制造出 4 MW 的高温超导电机,此后,美国超导体公司与诺斯洛普·格鲁门公司于 2007 年合作开发出世界上功率最大的船舶用推进超导电机,功率高达 36.5 MW<sup>[5]</sup>,从而验证了超导电机的技术可行性。由于超导线材在通入交流电流或者在交流磁场下会产生较大损耗,同时也严重影响超导体的性能,因此,目前旋转电机领域中主要将高温超导线材用作励磁绕组,并置于转子侧,通过滑环和电刷引入直流电流,采用直流励磁方式,由非导磁材料支架固定在转子上<sup>[6]</sup>,而电枢绕组则为常规铜绕组。基于高温超导材料的“零电阻”特性,采用较少匝数的超导励磁绕组,即可产生高达 2.5 T 左右的气隙磁场,而且无励磁损耗,电机转子无铁心,定子可以仅保留铁心的轭部,从而使得超导电机的体积和质量大大降低,但由于滑环和电刷的使用,电机需要定期维护。

就经济成本而言,超导电机的成本主要取决于高温超导材料及其冷却系统的运营成本。这也是高温超导电机目前没有大规模商业化运营的主要原因。然而,随着单机容量的增大和高温超导材料制备及其应用技术的迅速发展,可以预见高温超导材料的成本在整个电机成本中所占比例逐渐降低。已有研究表明,当电机容量达到 4.4 MW 时,超导材料及其冷却系统的成本仅占制造电机总成本的 2%<sup>[7]</sup>,使得大功率超导电机在风力发电及舰船驱动领域的优势更加明显。因此,大容量超导电机在低速直驱应用领域具备潜在的成本优势和商业化前景。

依据是否采用低温耦合传输装置实现低温冷却介质的传输和励磁功率的输入,可将旋转超导电机分为动态密封和静态密封超导电机两类。本

文分析了动态密封超导电机的常用定子、转子结构形式及其优缺点,揭示了静态密封超导电机能够实现冷却系统静态密封形式的本质原因,并对超导励磁绕组失超问题进行了探讨。

## 1 旋转超导电机分类

20 世纪 60 年代,美国 Aveo-Everett 实验室的 Stekly 等<sup>[8]</sup>提出并验证了图 1 所示的世界上第一台低温超导电机。该电机的励磁绕组由低温超导(LTS)线材绕制而成,容纳超导励磁绕组的冷却杜瓦置于静止的定子侧,并通过氦气冷却,以保证 LTS 线材的超导性能,而其旋转电枢绕组则由常规铜绕组构成,并通过滑环和电刷引出。随着低温制冷技术的发展,麻省理工学院的 Thullen 等<sup>[9]</sup>于 1971 年提出并验证了一种杜瓦旋转型低温超导电机,其超导励磁绕组由非导磁材料固定在转子侧,并置于具有真空夹层的杜瓦内,杜瓦随同转子旋转,为此需采用低温耦合传输装置,实现低温冷却介质在旋转的电机转子与静止的制冷设备之间循环流通。此类旋转杜瓦冷却系统的成功实现,加速了超导电机在全球范围内的研发进程,为现代超导电机的发展奠定了坚实基础<sup>[6,10-12]</sup>。

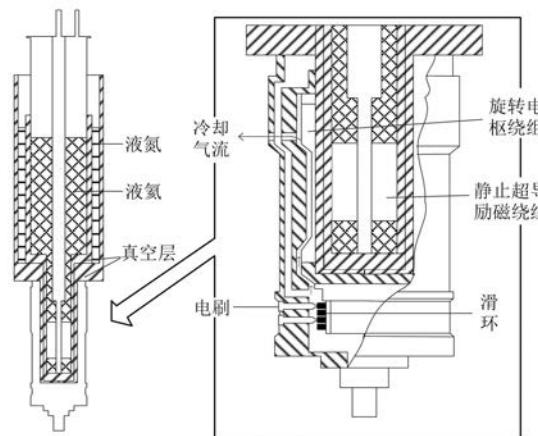


图 1 第一台低温超导电机<sup>[8]</sup>

根据超导电机的低温冷却系统结构形式,本文将超导电机归纳为两类,即采用低温耦合传输装置的动态密封超导电机和不采用该装置的静态密封超导电机。其中,动态密封超导电机根据其定转子是否采用铁心,又可细分为空气心(无铁心)和有铁心 2 种结构;对于静态密封超导电机而言,无论将超导绕组用作电枢绕组或者场励磁绕

组,超导绕组均需静止不动,因此,根据该类电机的电枢绕组是否旋转,将静态密封超导电机又分为电枢旋转型与电枢静止型两类。上述超导电机的具体分类如图 2 所示。

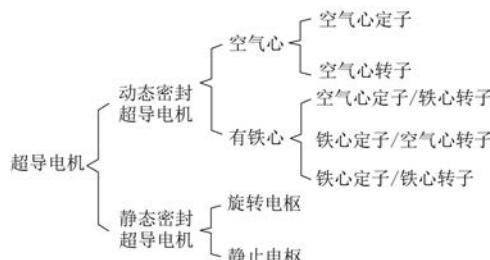


图 2 旋转超导电机分类

## 2 动态密封超导电机

就动态密封超导电机转子拓扑结构而言,根据转子是否采用铁磁性材料,可将其分为空气心转子和铁心转子两类<sup>[13]</sup>。2000 年 7 月,美国超导公司采用第一代高温超导线材,成功研制了一台 3 675 kW 的空气心转子 HTS 同步电动机<sup>[14]</sup>,其转子结构如图 3 所示。该电机无转子铁心,减轻了电机质量,但由于其励磁磁路的磁阻较大,为产生电机运行所需要的强磁场,必须使用大量的超导线材。

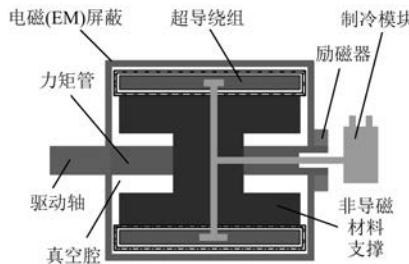


图 3 空气心转子

与空气心转子结构相比,铁心转子结构可有效降低励磁回路磁阻,从而减少超导线材用量,降低电机成本。其中,图 4 所示的“温转子铁心”结构通过复杂的绕组支撑将超导励磁绕组的冷却瓦固定于转子铁心,以减少超导绕组与转子铁心之间的热传导,但由于其转子铁心无需冷却,所需制冷量少、制冷周期短,因此可有效降低制冷系统功率。2001 年,德国西门子公司成功研发了 400 kW“温转子铁心”HTS 发电机,并在此基础上,于 2005 年成功开发了 4 MVA 等级样机<sup>[13-14]</sup>。

不同于“温转子铁心”结构,图 5 所示的“冷转子铁心”结构直接将超导励磁绕组固定在转子铁心上,无需复杂的支撑结构,降低了电机的加工难度,但由于需要冷却整个转子铁心,故所需制冷量大,而且为保证低温环境下转子的电磁性能和机械性能,需采用价格昂贵的特种铁磁材料,增加了电机的制造成本。西门子公司 2003 年开发的 400 kW 等级 HTS 电机即采用了上述“冷转子铁心”结构<sup>[15]</sup>。

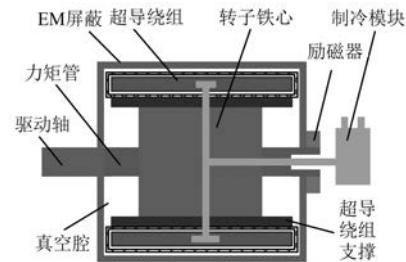


图 4 温转子铁心

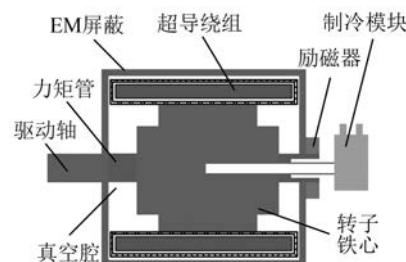


图 5 冷转子铁心

此外,就动态密封超导电机定子拓扑而言,目前大多数超导电机采用图 6 所示的铁心定子和空气心定子 2 种结构<sup>[16]</sup>。其空气心定子的齿部采用高强度非铁磁性支撑材料,避免了常规电机中的齿部磁饱和现象,适宜于强磁负载运行工况,且支撑材料很薄,节省了定子空间,从而可以增加电负载,故空气心定子结构可以提高电机功率密度,而且由于铁磁材料的减少,还可以有效降低铁耗,

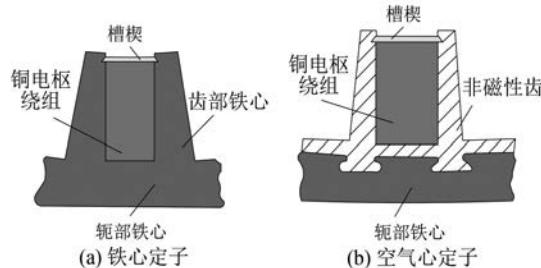


图 6 动态密封超导电机定子结构

改善电机效率。

图 7 所示为欧盟“地平线 2020 计划”资助的远景超导风力发电机 Ecoswing 实物图<sup>[17]</sup>。该电机为第一台兆瓦级直驱型风力发电用超导发电机,已在丹麦西海岸进行商业化运营。该电机采用冷转子铁心,故所需制冷量较大,制冷时间也较长。图 8 所示为其采用的低温耦合传输装置,其功能包括 2 个方面:(1)将静止压缩机提供的氦气传输到旋转的冷头;(2)为通过滑环和电枢为旋转的超导励磁绕组提供励磁功率。其全尺寸超导励磁绕组如图 9 所示。



图 7 超导风力发电机 Ecoswing<sup>[17]</sup>

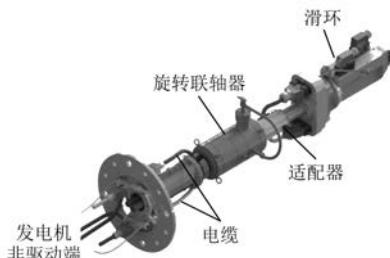


图 8 Ecoswing 低温耦合传输装置<sup>[17]</sup>



图 9 Ecoswing 高温超导绕组装配<sup>[17]</sup>

近年来,基于上述典型动态密封超导电机拓扑结构,韩国昌原大学 Sung 等<sup>[18]</sup>将“磁通泵”技术引入动态密封超导电机,提出了一种无刷励磁型动态密封超导电机,消除了超导绕组引入励磁

电流所必需的滑环电刷,对超导绕组的励磁技术研究进行了有益探索。2013 年,日本川崎重工业株式会社成功开发了 3 MW 等级的船舶驱动用动态密封超导电动机<sup>[19]</sup>,并进行了陆上耐久性试验及实船海上试验,加速了该类超导电机的商业化应用进程。虽然中国对动态密封超导电机的研究起步较晚,但近年来已经获得突破性进展,并取得了丰硕成果。在超导绕组制造方面,中国科学院电工技术研究所肖立业教授团队的 Li 等<sup>[20]</sup>制造了 100 kW 超导风力发电机全尺寸绕组,为超导绕组的绕制及固化积累了宝贵经验。电子科技大学金建勋教授团队的 Jiang 等<sup>[21]</sup>对风力发电用大功率超导发电机的超导绕组进行了优化设计,通过降低垂直磁场强度来提高超导线材的临界电流密度,为超导绕组优化设计提供了有益借鉴。在整机制造领域,2012 年,中船重工 712 所成功研发了国内首台兆瓦级船舶驱动用动态密封高温超导电动机,实现了从百千瓦级到兆瓦级的飞跃,提高了中国高温超导电机的自主研发能力<sup>[22]</sup>;2016 年,东方电气集团中央研究院采用第二代钇系高温超导线材开发出海上风力发电用低速动态密封高温超导发电机<sup>[23]</sup>,为高温超导发电机的实用化研究奠定了基础。

总体而言,动态密封超导电机具有高功率密度、高效率的显著优点,在海上风力发电及舰船驱动等低速直驱大功率应用领域具有广阔的应用前景。

### 3 静态密封超导电机

与动态密封超导电机不同,静态密封超导电机的超导绕组处于静止状态,无需采用低温耦合传输装置,因此,该类超导电机冷却系统结构简单,大大降低了超导电机的加工难度和制造成本,已成为超导电机领域的重要研究方向。2012 年,韩国又石大学的 Lee 等<sup>[24]</sup>提出并制造了一种电枢静止型轴向磁场单极性全超导电动机,以静态密封实现了对超导场励磁绕组和电枢绕组的冷却,具有冷却系统结构简单等优点,但其超导电枢绕组产生的交流损耗不仅降低了电机效率,而且限制了超导线材的临界电流。俄罗斯国立高等经济大学的 Kovalev 等<sup>[25]</sup>基于爪极转子结构,提出并制造了轴-径向磁场结构电枢静止型静态密封

爪极超导电动机,但其结构较为复杂,不利于兆瓦级电机的加工制造。

近年来,中国诸多高校学者对静态密封超导电机开展了广泛而深入的研究,并取得了一系列有益研究成果。哈尔滨工业大学李立毅教授团队的 Chen 等<sup>[26]</sup>提出了一种电枢静止型静态密封高温超导永磁同步电动机,并构建了其过冷液氮低温冷却系统,对该类超导电机低温冷却系统的设计进行了有益的探索和尝试。清华大学韩征和教授团队的 Qu 等<sup>[27]</sup>以高温超导线材作为电枢绕组,转子采用永磁体嵌入式结构,研制出电枢静止型 2.5 kW 静态密封高温超导永磁同步发电机,为静态密封超导电机的拓扑结构选择提供了新思路。华中科技大学曲荣海教授团队的 Wang 等<sup>[28]</sup>采用低温超导线材作为励磁绕组,提出一种 12 MW 等级的海上风力发电用电枢旋转型静态密封低温超导电机,该电机的超导绕组置于静止的内定子侧,空气心铜电枢绕组安装于旋转的外转子上,冷却系统结构简单,且采用价格相对低廉的低温超导线材,故具有成本优势。

借鉴定子永磁型电机的永磁体置于定子侧用以产生气隙磁场这一思路,结合磁通切换电机功率密度大、效率高及其结构上易于实现模块化设计等优点,中国石油大学(华东)的王玉彬副教授等<sup>[29-30]</sup>将传统意义上的磁通切换电机与高温超导技术相结合,提出并制造了一种如图 10 所示的转子分段式高温超导励磁磁通切换电机及低温冷却系统。其冷却介质采用价格低廉的液氮,同时由于超导励磁绕组和电枢绕组均置于静止的定子侧,因此该电机可以采用静态密封冷却结构,大大降低了电机和冷却系统的制造成本。



图 10 转子分段式高温超导励磁磁通切换电机及  
其低温冷却系统<sup>[29-30]</sup>

图 11 所示为该电机的超导磁体加工过程及加工完毕的成品磁体。图 12 给出了电机在额定转速

( $n = 167$  r/min)空载运行时的实测端电压波形。

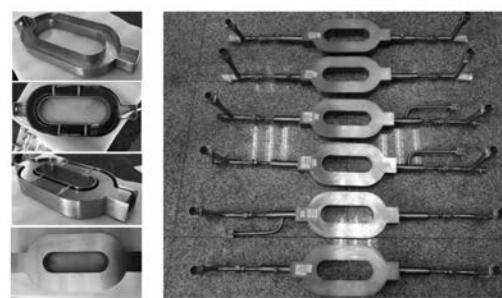


图 11 转子分段式高温超导励磁磁通切换电机  
高温超导磁体装配

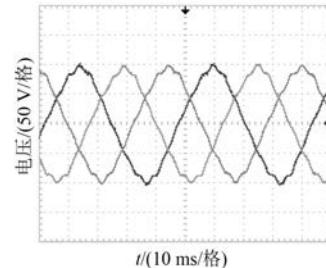


图 12 转子分段式高温超导磁通切换电机实测端电压波形  
(额定转速  $n = 167$  r/min, 额定励磁电流  $I_f = 40$  A)

此外,为探索行之有效的静态密封超导电机拓扑结构,该课题组提出了一种基于磁场调制原理的双定子场调制高温超导发电机,电机结构配置如图 13 所示<sup>[31]</sup>。置于内定子侧的超导励磁绕组产生的静止励磁磁场被旋转的调磁环转子调制。由于调磁环转子磁阻交替变化,因此在内外气隙中调制出一系列旋转的空间谐波磁场,该谐波磁场匝链位于外定子的电枢绕组,从而产生出感应电动势。若转子导磁块数、外定子电枢绕组极对数和内定子励磁绕组极对数三者之间满足一定关系,则电机能稳定运行。该超导电机的优势可以概括为以下 2 个方面:(1)取消了动态密封超导电机所必需的滑环和电刷,从而提高了电机

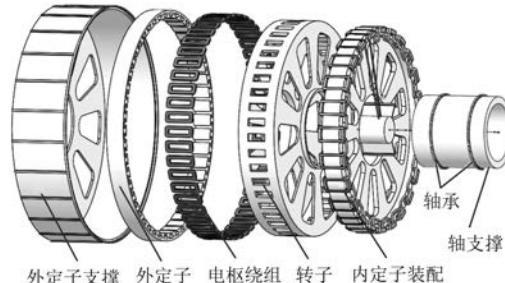


图 13 双定子场调制高温超导发电机<sup>[31]</sup>

运行可靠性;(2)超导励磁绕组置于静止内定子侧,在实现冷却系统静态密封以及降低制造成本的同时,还可以充分利用电机的内部空间,改善电机的转矩/功率密度。

值得一提的是,在探索静态密封超导电机拓扑结构方面,中国石油大学(华东)的李祥林副教授等<sup>[32]</sup>提出了一种满足超深井钻井顶驱系统性能要求的静态密封单体励磁分极式高温超导电机,其结构如图 14 所示。该电机具有以下优点。

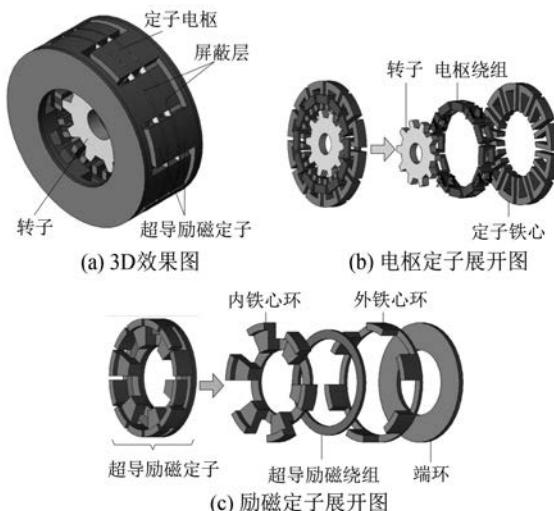


图 14 静态密封单体励磁分极式高温超导电机<sup>[32]</sup>

(1) 超导励磁绕组采用“圆环形”结构,降低了 HTS 线材绕制时受临界弯曲半径影响引起失超的可能性,同时采用励磁分极结构实现了 HTS 励磁绕组的单体杜瓦设计,降低了冷却系统制造难度和加工成本,易于实现产业化。

(2) 采用轴-径向磁路相结合的轴向两段式定子结构,实现了电枢定子和励磁定子在物理空间上的分离,消除了电枢绕组与 HTS 励磁绕组均置于同一定子情形下存在的空间布局协调和热辐射影响问题。

(3) 电枢定子和励磁定子之间放置屏蔽环,可消除电枢反应磁场对 HTS 励磁绕组的影响,避免临界磁场变化引起的 HTS 线材失超,从而提高电机运行的可靠性。

#### 4 共性问题

超导电机的稳定可靠运行是其获得优良电磁性能的必要前提条件,因此,在超导电机运行过程

中需严格控制超导励磁绕组的临界电流密度、临界温度及其临界磁场强度这 3 个具有强关联性的临界参量,从而保证超导励磁绕组工作于超导状态。当电机负载运行时,超导励磁绕组将处于外施电枢反应磁场中,特别是在电枢短路故障这种极端工况的暂态过程中,短路初瞬的冲击电流可达到其额定电流的十几倍到二十几倍,近似纯退磁作用的电枢反应磁场极强。此时,临界磁场强度成为超导励磁绕组临界参量中的主要因素。

对动态密封超导电机而言,超导励磁绕组以同步速旋转,即超导励磁绕组和电枢反应磁场之间无相对运动,这意味着电枢反应基波磁场在超导励磁绕组中并不产生磁滞损耗。在电枢静止型静态密封超导电机中,超导励磁绕组位于静止的定子侧,静止不动,电枢反应磁场则以同步速旋转,也就是说,超导励磁绕组处于交变的磁场中,故必然会产生磁滞损耗,特别是在电枢短路故障这种极端工况的暂态过程中,若磁滞损耗大于超导线材的最小失超能,则会引起失超。因此,该类静态密封超导电机外施电枢反应磁场导致的超导励磁绕组失超,成为一个亟待解决的问题。

动态密封超导电机中,多在转子侧设置铜屏蔽层,抑制电枢反应磁场对超导励磁绕组临界电流的影响。对静态密封超导电机而言,单一的屏蔽层设置已无法有效抑制电枢反应磁场的影响。针对这一问题,东南大学的程明教授等<sup>[33]</sup>从电机本体设计层角度出发,提出了一种抑制双定子超导电机中电枢反应磁场对超导线圈影响的组合方法。其关键点在于在电机设计中同时引入双定子结构、鼠笼式阻尼绕组和铜涡流屏蔽层,合理配置 3 种组合措施抑制电枢反应磁场,最终使得该类场调制超导电机中电枢反应磁场对超导线圈的影响水平与超导励磁同步电机相当。其结构配置及运行原理如图 15 所示。

由图 15(b)可以看出,当电枢反应磁场作用于位于超导励磁绕组上方的阻尼绕组时,由于电磁感应作用,在阻尼导体中产生感应电动势,该电动势必然会在端部短路闭合的阻尼绕组中产生感应电流。感应电流产生的磁场与电枢反应磁场相互抵消,从而可以有效地抑制电枢反应磁场对超导励磁绕组的影响。这种电枢反应磁场抑制策略不仅适用于双定子场调制超导电机,对于其他拓

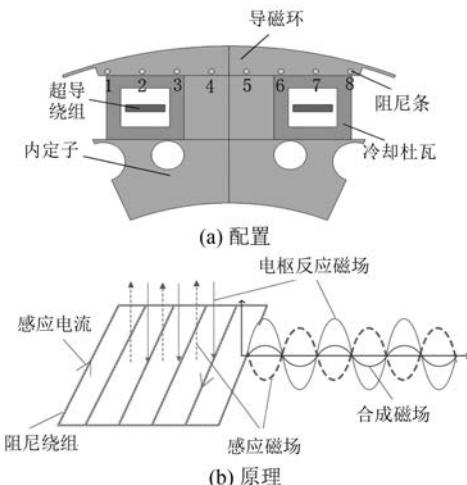


图 15 抑制电枢反应磁场阻尼绕组配置及原理<sup>[33]</sup>

扑结构的静态密封超导电机同样具有借鉴意义。

## 5 结语

本文对旋转超导电机的发展现状进行了分析研究。依据是否采用低温耦合传输装置实现低温冷却介质的传输和励磁功率的输入,将旋转超导电机分为动态密封超导电机和静态密封超导电机两类。针对动态密封超导电机的转子结构形式,对比分析了空气心转子、温铁心转子和冷铁心转子的优缺点,同时给出了该类电机的定子结构形式,阐明了空气心定子和冷铁心定子的优缺点。针对静态密封超导电机,主要对转子分段式磁通切换结构、场调制双定子结构、单体励磁分极式结构等典型拓扑进行了分析,揭示了其能够实现冷却系统静态密封形式的本质原因。此外,针对两类超导电机面临的超导励磁绕组失超这一共性问题进行了探讨,从电机本体结构层面,给出了静态密封超导电机抑制电枢反应磁场对超导线圈影响的策略和方法。

## 【参考文献】

- [1] 严陆光.高临界温度超导应用的进展与展望[J].电工电能新技术,2006,25(1):1.
- [2] YAN L. Recent progress of superconducting magnet technology in China [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2010,20(3):123.
- [3] SNITCHLER G. Progress on high temperature superconductor propulsion motors and direct drive wind generators [C] // Proceedings of the IEEE International Power Electronics Conference, Sapporo, Japan,2010: 5.
- [4] 邓自刚,王家素,王素玉,等.高温超导飞轮储能技术发展现状[J].电工技术学报,2008,23(12):1.
- [5] GAMBLE B, SNITCHLER G, MACDONALD T. Full power test of a 36.5 MW HTS propulsion motor [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011,21(3): 1083.
- [6] KALSI S S, WEEBER K, TAKESUE H, et al. Development status of rotating machines employing superconducting field windings [J]. Proceedings of the IEEE,2004,92(10): 1688.
- [7] SCHIFERL R, FLORY A, LIVOTI W C, et al. High-temperature superconducting synchronous motors: economic issues for industrial applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008,44(5): 1376.
- [8] STEKLY Z J J, WOODSON H H, HATCH A M, et al. A study of alternators with superconducting field windings: II experiment [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1966, PAS-85 (3): 274.
- [9] THULLEN P, DUDLEY J C, GREENE D L, et al. An experimental alternator with a superconducting rotating field winding [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1971, PAS-90(2): 611.
- [10] NICK W, NEROWSKI G, NEUMÜLLER H-W, et al. 380 kW synchronous machine with HTS rotor windings-development at Siemens and first test results [J]. Physica C: Superconductivity, 2002, 372-376 (3): 1506.
- [11] DOMBROVSKI V, DRISCOLL D, SHOYKHET B A, et al. Design and testing of a 1 000 hp high-temperature superconducting motor [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20 (3): 638.
- [12] SNITCHLER G, GAMBLE B, KALSI S S. The performance of a 5 MW high temperature superconductor ship propulsion motor [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15 (2): 2206.
- [13] GAMBLE B, SNITCHLER G, KALSI S S. HTS generator topologies [C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting,2006.
- [14] KALSI S S. Development status of superconducting

- rotating machines [ C ] // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2002: 401.
- [15] KLAUS G, NICK W, NEUMULLER H W, et al. Advances in the development of synchronous machines with high-temperature superconducting field winding at Siemens AG [ C ] // IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006.
- [16] FOGARTY J M. Development of a 100 MVA high temperature superconducting generator [ C ] // IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004: 2065.
- [17] SONG X, BUHRER C, BRUTSAERT P, et al. Designing and basic experimental validation of the world's first MW-class direct-drive superconducting wind turbine generator [ J ]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(4) : 2218.
- [18] SUNG H J, GO B S, PARK H, et al. Design, fabrication, and analysis of HTS coils for a 10 kW wind power generator employing a brushless exciter [ J ]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(4) : 5202305.
- [19] YANAMOTO T, IZUMI M, YOKOYAMA M, et al. Electric propulsion motor development for commercial ships in Japan [ J ]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(12) : 2333.
- [20] LI X, HAN L, YANG X, et al. Design and model test of the racetrack excitation coil in a novel high temperature superconducting generator [ J ]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20 (3) : 1081.
- [21] JIANG Z, JIN J, ZHENG L, et al. HTS field coil optimization for large capacity generators [ J ]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26 (7) : 4902405.
- [22] 白利锋, 张平祥. 高温超导电机研究进展 [ J ]. 低温物理学报, 2016, 38(5) : 1.
- [23] YANG Y, DUAN S Y, REN Y, et al. Design and development of a cryogen-free superconducting prototype generator with YBCO field windings [ J ]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4) : 5200205.
- [24] LEE J K, PARK S H, KIM Y, et al. Electrical properties analysis and test result of windings for a fully superconducting 10 hp homopolar motor [ J ]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(3) : 5201405.
- [25] KOVALEV K L, VERZHBITSKY L G, KOZUB S S, et al. Brushless superconducting synchronous generator with claw-shaped poles and permanent magnets [ J ]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(3) : 5203204.
- [26] CHEN A, XU F Y, LIU X K, et al. Sub-cooled liquid nitrogen test system for cooling HTS synchronous motor [ J ]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 2(3) : 4701304.
- [27] QU T M, SONG P, YU X Y, et al. Development and testing of a 2.5 kW synchronous generator with a high temperature superconducting stator and permanent magnet rotor [ J ]. Superconductor Science & Technology, 2014, 27(4) : 044026.
- [28] WANG J, QU R, TANG Y, et al. Design of a superconducting synchronous generator with LTS field windings for 12 MW offshore direct-drive wind turbines [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(3) : 1618.
- [29] WANG Y, WANG C, FENG Q, et al. Fabrication and experiment of racetrack HTS magnet for stator field-excitation HTS machine [ J ]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27 (4) : 5201605.
- [30] WANG Y, FENG Q, LI X, et al. Design, analysis, and experimental test of a segmented-rotor high-temperature superconducting flux-switching generator with stationary seal [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(11) : 9047.
- [31] ZHU X, CHENG M, WANG Y. Topology analysis, design, and comparison of high temperature superconducting double stator machine with stationary seal [ J ]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(1) : 5200110.
- [32] LI X, YU S, WANG Y. A novel HTS claw-pole vernier machine using single excitation unit with stationary seal [ J ]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5) : 5201505.
- [33] CHENG M, ZHU X, WANG Y, et al. Effect and inhibition method of armature-reaction field on superconducting coil in field-modulation superconducting electrical machine [ J ]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35 (1) : 279.