

# 交直流电力集成技术

马伟明

(海军工程大学电力电子技术应用研究所, 武汉 430033)

**[摘要]** 建立了新型电机的数学模型, 为解决关键技术问题提供了理论基础。查明了发电机整流系统特有的低频功率振荡的机理, 得出了稳定判据及解决稳定问题的技术措施; 通过合理设计, 可控制直流电压的浮动范围; 综合治理整流过程引起的交流谐波和直流脉动, 提高了系统的 EMC 性能; 巧妙地处理了系统的强非线性, 从而得出了直流短路和交直流同时短路的冲击电流解析式; 提出了根据整流装置输入、输出电压波形进行实时在线故障诊断的原理和方法。在此基础上, 将定子 3 相绕组、12 相绕组、整流装置、励磁系统、励磁调节器等集于一体, 成功研制出性能优良的交直流发电机, 能同时提供高品质交直流电源, 为独立电力系统的集成化奠定了基础。

**[关键词]** 电力集成; 双绕组交直流发电机; 12 相整流; 交直流同时供电; 独立电力系统

**[中图分类号]** TM31; TM33; TM34 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)12-0053-07

## 1 交直流电力集成技术思想

在舰船、飞机, 移动通讯、石油钻井平台等独立系统中, 实现发供电系统的小型化、高功率密度、高可靠性、高品质是世界各国梦寐以求的目标。特别是在舰船和飞机上, 设备繁多, 空间狭小, 重量受严格控制, 交直流电制共存的条件下, 如何同时提供高品质、大容量的交直流电力一直是一个受到密切关注的重大难题<sup>[1,2]</sup>。一般说来, 独立系统中 3 相交流发电机是基本电源, 不同电压、不同频率的供电电源都可由此交流电源变换得到, 见图 1。其途径有两条: 传统的方法是采用交直流发电机机组经相应的配电设备分别供电, 因其体积重量大, 在体积重量受严格限制的独立系统中难以采用; 另一途径是采用电力电子变流装置 (AC/DC, DC/AC), 但在主电网容量有限而变流容量又较大的情况下, 大容量变流装置实现较难, 可靠性低, 电磁干扰大。

设想通过 1 台电机, 既产生交流电, 也产生直流电, 即把整流变换及励磁控制与传统的电机设计巧妙地结合, 形成交直流发电机, 该发电机具有 2 套定子绕组, 同时输出 3 相交流和经内部整流后的

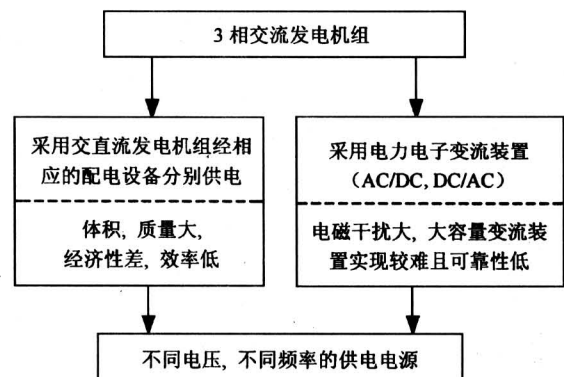


图 1 独立电力系统供电方式

Fig.1 Modes of power supply in self-contained electrical systems

平稳直流, 形成交直流电网。独立系统中交、直流 2 种基本电源共存, 电气上相互隔离, 交流电源对交流负载和升降压变压器供电, 直流电源给直流负载和直流斩波器供电。系统所需要的变频电源或其他中频电源, 则由直流电源经逆变器获得, 其原理图见图 2。该系统可单机交直流供电、多机交流并联供电及直流并联或串联供电, 将交直流供电进行电力集成, 实现系统小型化、大容量、高品质的目

**[收稿日期]** 2002-07-12; **修回日期** 2002-00-00

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目 (59777007)

**[作者简介]** 马伟明 (1960-), 男, 江苏扬中市人, 中国工程院院士, 海军工程大学教授, 博士生导师

的,从而使前面所说的难题得到较好的解决。这种电力集成新技术也正是21世纪应该大力发展的一种新技术。

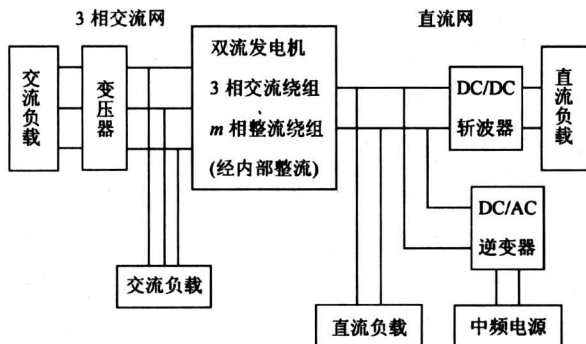


图2 交直流发电机系统示意图

Fig.2 Diagrammatic sketch of an AC-DC generator system

## 2 难点和关键技术

交直流电力集成技术的难点在于研制交直流发电机。关于这种发电机,国内外没有相关技术和经验可供借鉴,也没有相应的理论体系支撑。因此,设计出结构合理的交直流发电机并建立完整的理论体系,是解决问题的基础。除此之外,还存在一些国际上长期未能很好解决的关键技术。

1) 系统运行稳定性 2台交直流发电机在交流侧既不并联也不带负载时,系统相当于二台整流发电机并联供电。这类整流发电机带反电势负载或者多机整流并联带任意负载时,有可能产生一种固有低频功率振荡而造成系统失效<sup>[3,4]</sup>,特别是隐极发电机,几乎无一例外地会发生固有振荡,如图3所示。日本、德国等西方国家也发现了这一现象,但没有找到其振荡产生的机理及解决措施,而是通过试验选用合适的凸极电机来构成该类供电系统。

2) 系统电磁兼容 严重干扰系统设备正常工作的EMI问题,集中表现为非线性电力设备在供电系统中产生大幅值差模、共模传导干扰。准确预测和有效抑制其传导干扰是国内外至今尚未解决的技术难题。

3) 交直流突然短路冲击电流和冲击转矩的确定 交直流发电机可能出现交流网短路、直流网短路和交直流网同时短路的故障。3相突然短路已有成熟的分析与试验方法。对于整流绕组直流侧突然短路和交直流网同时突然短路,由于整流装置的非

线性,现有计算方法误差大,国内外大多数是通过反复破坏性试验来确定其最大短路电流和冲击转矩。

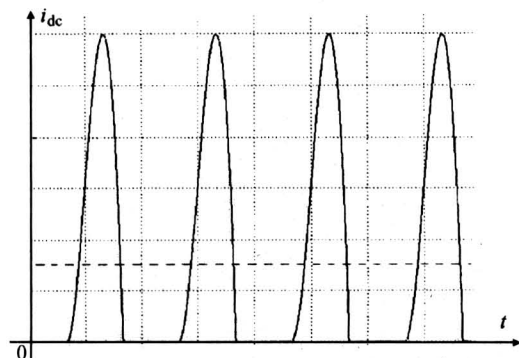


图3 同步发电机整流系统电流振荡波形

Fig.3 Waveform of current oscillation in a synchronous generator-rectifier system

4) 多相整流元件的故障实时诊断 交直流发电机易发生故障的部件主要是整流元件。当整流元件发生故障时,电机将因局部过载而损坏,因此需要实时在线诊断整流装置的故障。国内外(包括美国、德国等)传统的方法是在每个整流元件支路中串入电流互感器,检测支路电流来判别其故障。对于3相整流系统,只有6个整流元件,这种方法实现并不困难。对于大功率多相整流装置,由于整流元件多,电流大,采用检测电流的方法具有明显缺点:电流传感器多,信号线多。对于整流装置集成在电机内部的结构型式,此方案无法采用。

如果交直流电力集成技术取得成功,则舰船、飞机,移动通讯、石油钻井平台等独立系统的供电方式就会实现质的飞跃,这将是一场具有深远影响的技术变革。

## 3 交直流集成技术的实现

从1991年起,我们就开始 $m$ 相/ $n$ 相( $m=3, n=3, 6, 9, 12, \dots$ )交直流电力集成技术的研究。在某独立系统中,主要供电系统是交流电网,而直流负载容量约占总负载容量的40%。该系统对供电品质要求高,体积重量又受到严格限制。为此,将所提出的交直流电力集成技术应用到该独立系统中,并攻克了上述难点和关键技术。

### 3.1 交直流发电机设计

将3相交流绕组与 $n$ 相整流绕组嵌放在同一定子铁心槽内,共用1套转子和励磁,3相主绕组

给交流电网供电,  $n$  相绕组经不可控整流给直流电网供电。整流装置放在电机通风道内, 与电机共用同一冷却系统, 使系统的集成度进一步提高, 电机对外仅引出交流 3 相及直流正负共 5 根端线。对  $n = 6, 9, 12, \dots$  做了分析比较, 换相电流及其产生的 EMI 幅值, 虽然均能满足直流电网供电品质要求, 但是从减小换相电流及其产生的 EMI 幅值看, 12 相整流换相电流较小, 由此引起的交流侧电压波形畸变及 EMI 也较小, 而电机制造又不困难, 因此选定 3 相交流和 12 相整流结构形式的交直流发电机, 其电路原理如图 4。

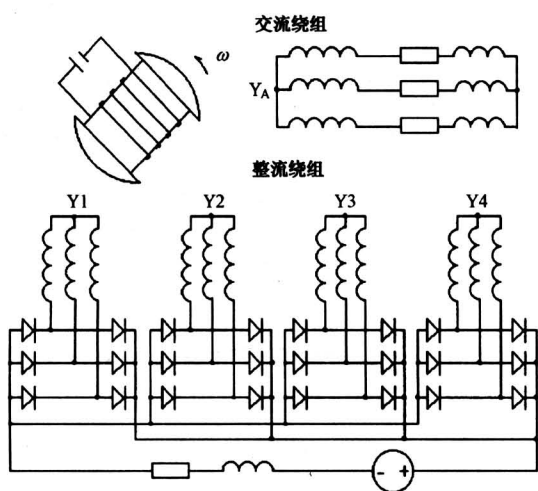


图 4 3 相交流/12 相整流发电机电路原理图

Fig.4 Schematic circuit of a 3-phase AC and 12-phase rectified DC generator

### 3.2 数学模型和参数

该电机定子上有 3 相和 12 相 2 套绕组, 虽然 2 套定子绕组没有电路联系, 但是共处于同一磁场中, 共用 1 套励磁系统, 存在着复杂的电磁耦合关系。即使不考虑转速变化及交流励磁机、励磁调节器和负载的动态方程, 系统的阶数也高达 14 阶, 而且, AC/DC 变流环节的存在, 使系统为强非线性。

在分析各绕组分布特点及其相互耦合关系的基础上, 提出了描述该电机行为的最小参数集合, 建立了相应的数学模型<sup>[5]</sup>, 为研究其动态过程和运行性能以及进行数字仿真提供了理论基础。该模型的特点是可以借助 3 相电机的物理概念来理解交直流发电机各电磁参数的物理意义, 因而, 对于利用该模型进行分析计算所得出的结果, 也就易于理解和便于应用。分析表明, 3 相和 12 相绕组的漏电

抗尤其是互漏抗对电机性能有很大影响。为此, 应用电机电磁场的理论和方法, 对复杂的绕组端部漏抗进行了详细计算。

在分析单 Y 绕组参数与 4Y 绕组参数关系的基础上, 提出了通过单 Y、2Y、4Y 绕组常规试验测取该类电机参数的方法。

### 3.3 系统稳定性

2 台交直流发电机直流侧不并联时, 系统类似于普通 3 相发电机并联系统, 其稳定性的研究已很成熟。交直流侧同时并联供电时, 发现交流网并联有利于整流并联系统的稳定。稳定性最差的工况是交流网既不并联也不带负载, 因为此时系统相当于 2 台整流发电机并联供电, 它会产生固有振荡问题。因此, 问题的关键是如何解决 12 相整流发电机的稳定性。20 世纪 80 年代中期我们开始研究这类系统, 通过大量的试验、分析和仿真, 查明了固有振荡的机理, 即由于转子绕组磁链守恒作用, 电流扰动引起的整流桥交流侧电压变化量有可能超过直流侧电压变化量, 从而影响整流桥的关断与导通, 形成低频功率振荡。为此, 提出了系统的稳定判据<sup>[3,4]</sup>, 工程上可简化为

$$\frac{x'_d}{x'_q} > \frac{1}{5}$$

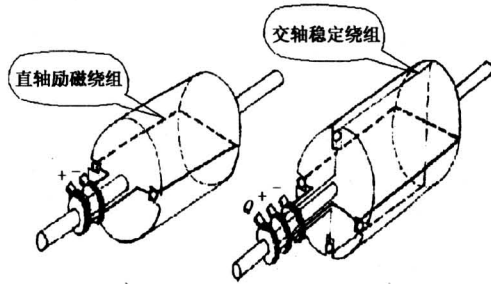
影响稳定性的主要因素是交直轴瞬变电抗配置是否恰当。解决该问题主要有 2 种途径: 1) 设计电机时合理配置参数: 对于凸极电机, 采取措施使  $x'_d/x'_q > 1/5$ ; 隐极电机设计时不可能象凸极电机那样容易满足稳定条件, 为此发明了转子上设置交轴稳定绕组的隐极电机, 如图 5 所示。2) 对于已制成的不能稳定运行的电机, 可从控制方面解决: 根据反馈控制的基本原理, 利用振荡信号来消除振荡, 将据此发明的带电流微分自适应控制策略和系统时间常数合理匹配的的稳定装置, 加入原励磁控制系统中, 就能有效地抑制固有振荡, 如图 6 所示。

所设计的隐极式交直流发电机, 采用了交轴稳定绕组技术, 能确保在任意工况下都不出现固有振荡。

### 3.4 励磁调节与直流侧电压浮动

由于交直流绕组处在同一磁路上, 共用 1 套励磁调节器, 为了减小 2 电网的相互影响, 简化系统控制, 只保持交流电压不变, 而直流电压是浮动的, 但其浮动范围必须满足对电网供电品质的要

求。从减小直流电压浮动范围考虑，应使2套绕组耦合紧密；但从减小直流网电流换相对交流网产生的电磁干扰来看，则希望2套绕组电磁耦合越弱越好。设计交直流发电机时，为了兼顾这些相矛盾的要求，在满足直流电压浮动范围的前提下，尽可能减弱2套绕组的电磁耦合程度。为此，12相绕组采用2/3节距，而3相绕组则采用5/6节距。



a. 仅有直轴励磁绕组的转子 b. 具有直轴励磁绕组和交轴稳定绕组的转子

图5 隐极电机的转子

Fig.5 Rotor of a non-salient pole type machine

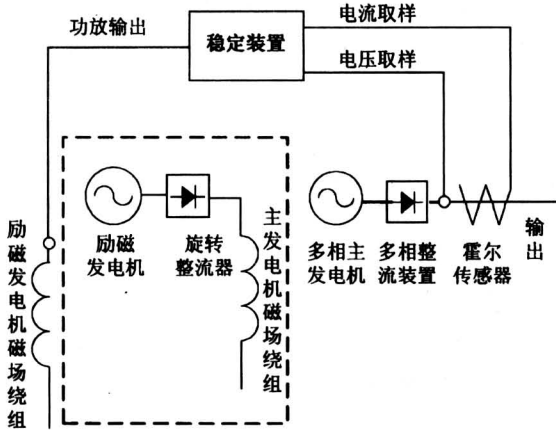


图6 接有稳定装置的整流发电机

Fig.6 Rectifier-loaded synchronous generator with stabilizer

3.5 电磁兼容

在电机设计中，采取优选定转子槽数、槽形、主绕组分布和节距及斜槽、全阻尼等措施，使交流输出电压尽可能正弦化。同时，在保证直流电压浮动范围满足要求的条件下，尽可能减弱2套绕组的耦合作用，使整流电流换相过程产生的电磁干扰，通过磁场传递到3相交流绕组的影响最小。另外，4个3相整流桥在直流侧并联，可使换相电流幅值降低到1/4，再设法降低12相绕组的换相电抗（主要是单Y绕组的超瞬变电抗尤其是漏电抗），

可使换相重叠角进一步减小，有利于减弱电流换相对交流电网电压波形的影响。

同时为了抑制整流电流换相过程中较高的  $du/dt$  和  $di/dt$  产生的传导干扰，建立了适合于传导干扰分析的系统数学模型，编制了相应的EMI预测软件，利用该软件优化了整流元件RC阻容吸收组件<sup>[6]</sup>和在整流桥输出端增设差模和共模干扰抑制组件等技术措施，较好地解决了EMC问题。

3.6 交直流短路冲击电流及冲击转矩

对于3相突然短路，已有成熟的分析和试验方法。对于直流侧突然短路，巧妙地将一个高阶强非线性系统转化为多个低阶线性系统求解，再作非线性合成，得出直流侧突然短路的冲击电流及其产生的冲击转矩。具体来讲：12相整流装置直流侧突然短路，对交流侧而言，可等效为12相交流绕组突然对称短路，从而可求出各3相整流桥交流侧各相短路电流的表达式，再考虑整流元件的单向导电性，可得到各3相整流桥直流侧电流  $i_{dcj}$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) 的表达式，最后将它们按一定的相位关系合成，便可得到直流侧短路电流的峰值，见图7。此方法可以推广到  $n$  相整流发电机系统。

采用同样的方法，并计及2套绕组间的耦合关系，还求得了交直流侧同时突然短路的电流和转矩的解析式<sup>[7]</sup>。结果表明，交直流侧同时突然短路与交直流侧分别突然短路相比，冲击电流要小一些，但冲击转矩最大。还查明了12相整流系统直流侧突然短路时冲击电流和转矩分别出现于短路发生后约  $T/2$  和约  $T/4$  时刻，而且它们的数值实际上与短路初始角无关。这一重要发现明确了12相整流发电机只需做一次短路试验即可确定保护装置整定值，而按照传统做法则要做多次短路试验，这对电机寿命是很不利的。

3.7 多相整流装置的故障诊断

提出了仅根据整流装置输入、输出电压波形进行实时在线诊断整流元件所处状态的新原理：实时采样整流装置的输入、输出电压波形，通过设置2个信号地，经变换得到各整流元件的电压波形，分析整流元件正常导通与故障状态（直通和断路）时电压波形的差异，提出了整流元件断路和直通的特征函数及相应的特征值<sup>[8]</sup>。

断路特征函数

$$f_{oi}(t) = (du_i/dt)^2, \text{ 当 } u_i \leq 0 \text{ 时,}$$

$$f_{oi}(t) = 0, \text{ 当 } u_i > 0 \text{ 时,}$$

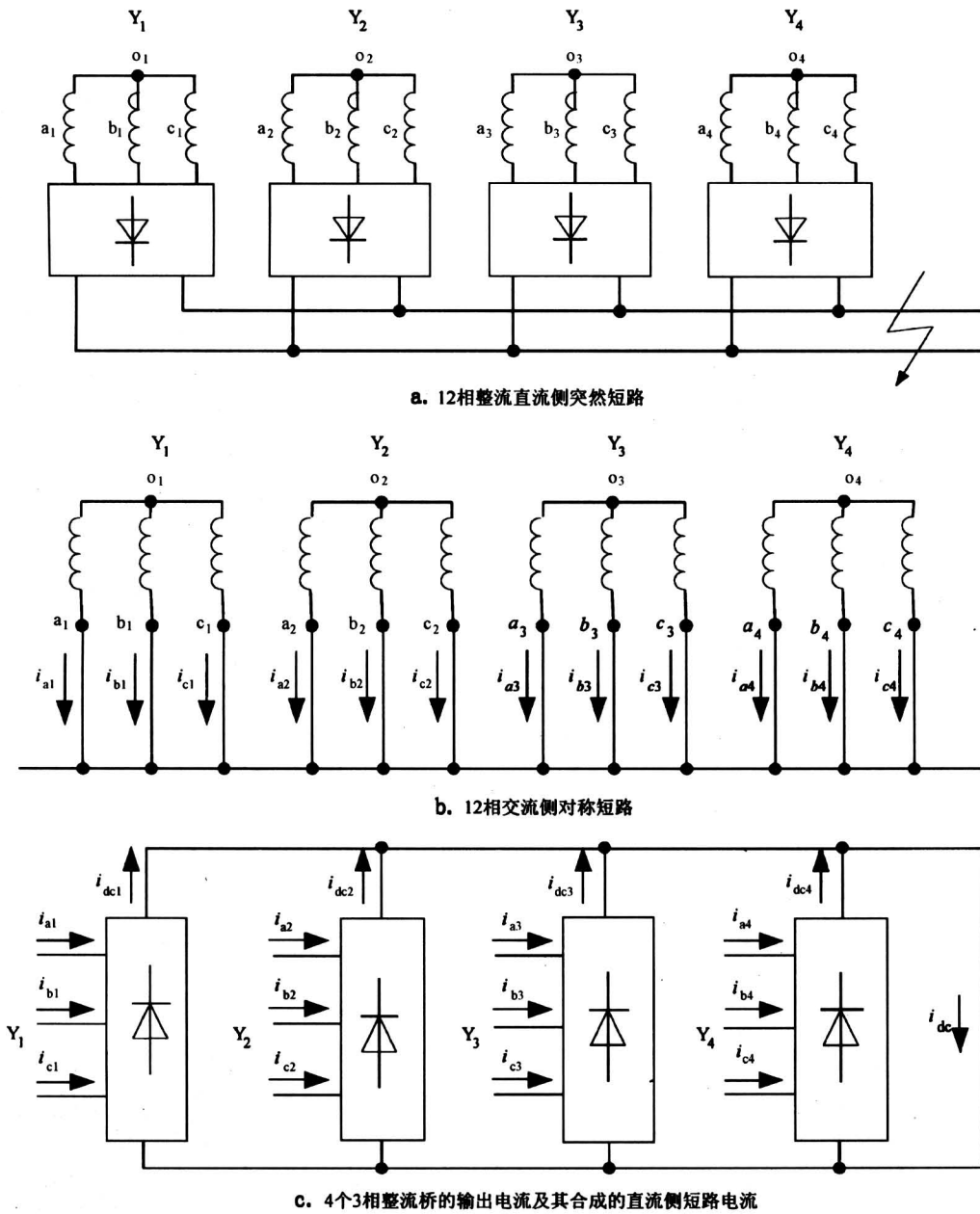


图 7 直流侧短路电流计算思路示意图

Fig.7 Schematic circuits showing the train of thought for DC side short-circuit current calculation

直通特征函数  $f_{si}(t) = u_i(t)$ ,

其中,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ,  $u_i(t)$  为第  $i$  个整流元件电压,  $N$  为整流元件总数。

反映整流元件状态的特征值:

$$\lambda_{oi} = \int_0^T f_{oi}(t) dt,$$

$$\lambda_{si} = \int_0^T f_{si}(t) dt,$$

$T$  为交流电压变化的周期。

根据发电机电压波形和整流元件特性, 选择恰

当的常数  $s$ 。

若  $\lambda_{oi} > s$ , 则第  $i$  个整流元件处于断路故障状态。

若  $\lambda_{si} = 0$ , 则第  $i$  个整流元件处于直通故障状态。

若  $\lambda_{si} > 0$  且  $\lambda_{oi} < s$ , 则第  $i$  个整流元件处于正常工作状态。

利用上述整流元件状态的特征值, 可以很方便地对多相整流装置进行故障在线实时诊断。据此原

理研制成功的 12 相整流装置故障在线实时诊断装置，未曾发生误判或漏判。

### 4 初步结果

在攻克了上述难点和关键技术的基础上，研制成功了集同轴无刷励磁系统、励磁调节器、12 相整流装置及 3 相、12 相绕组于一体的转子上带有交轴短路稳定绕组的交直流电力集成新型发电机(图 8)，以此为核心构成了新型交直流同时供电的独立电力系统。与交直流分别供电的 2 台发电机组相比，该机组的体积、质量和工程造价都减小 40% 以上。2 台工程样机通过了工厂型式试验及与原动机配机试验，对单机交直流供电，双机交流并联供电、直流并联或串联供电等各种工况下的稳态和动态性能进行了全面的严格考核，全面达到甚至超过规定的指标(见表 1)，实现了该系统的小型化，

经济性好，并具有高可靠性和优良的电磁兼容性。

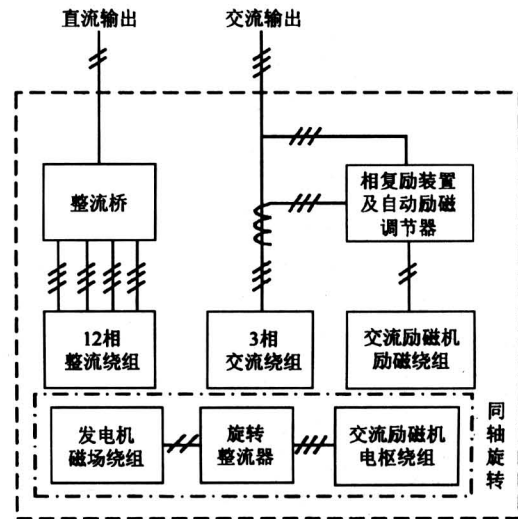


图 8 集成化交直流发电机方块图

Fig.8 Block diagram of an integrated AC-DC generator

表 1 3 相/12 相交直流发电机主要性能

Table 1 Main performance of the developed 3-phase/12-phase AC-DC generator

内容	要求	试验结果	说明
交流电压波形畸变率(VHD)/%	≤4	交流满载时 0.5 交直流满载时 0.9	美国军标 MIL-G-3124D 要求: 带线性负载时 ≤1
单次谐波最大幅值/%	≤2	交流满载时 0.33 交直流满载时 0.43	美国军标 MIL-G-3124D 要求: 带线性负载时 ≤0.3
直流电压脉动系数/%	≤2	空载时 0.26 交直流满载时 0.8	
交流电压调整率/%	优于 ±1	±0.41	
直流电压浮动范围/%	±6	±5.64	
突加(卸)规定负载时	交流电压跌落(升高)/% 电压恢复时间/s	11.04 (11.8) 0.56(0.6)	
电磁容性	满足国军标 GJB151A-97	满足	美国 MILSTD 461D
运行稳定性	任意工况下均稳定	稳定	
双机交直流侧都并联	交流有功功率分配差度/% 交流无功功率分配差度/% 直流功率分配差度/%	2.7 3.9 3.0	
发电机效率 /%	≥94	交流满载时 94.86 交直流满载时 95.24	

### 5 结语

所发明的电力集成电机，将定子 3 相绕组、12 相绕组、整流装置、励磁系统、励磁调节器等集于一体，能同时提供高品质交直流电源，特别适用于对性能和尺寸有严格要求的独立系统中。建立了新

型电机的数学模型，为解决关键技术问题提供了理论基础。查明了发电机整流系统特有的低功率振荡的机理，得出了稳定判据及解决稳定问题的技术措施；可控制直流电压的浮动范围；综合治理整流过程引起的交流谐波和直流脉动，提高了系统的 EMC 性能；巧妙处理系统的强非线性，得出了直

流短路和交直流同时短路的冲击电流解析式; 根据整流装置输入、输出电压波形进行实时在线故障诊断。该交直流发电机研制成功, 满足发供电系统的小型化、高功率密度、高可靠性、高品质的需求, 为独立电力系统的集成化奠定基础, 开创交直流电力集成新技术的研究, 必将推动独立电力系统技术的发展。

#### 参考文献

- [ 1 ] Franklin P W. A Theoretical study of the three phase salient pole type generator with simultaneous AC and bridge rectified DC output [J]. IEEE Trans, 1973, PAS-92(2): 543~557
- [ 2 ] Schiferl R F, Ong C M. Six phase synchronous machine with AC and DC stator connections [J]. IEEE Trans, 1983, PAS-102(8): 2685~2701
- [ 3 ] 马伟明. 十二相同步发电机及其整流系统的研究 [D]. 北京: 清华大学研究生院, 1995
- [ 4 ] Ma Weiming, Hu An, Liu Dezhi, et al. Stability of a synchronous generator with diode-bridge rectifier and back-EMF load [J]. IEEE Trans, 2000, EC-15(4): 458~463
- [ 5 ] Wu Xusheng, Ma Weiming, Sun Junzhong, et al. Analysis and study on the mathematical models of a 3- and 12-phase generator with hybrid AC-DC supply [A]. Proceedings of IMECE' 2000 [C]. Shanghai, 2000
- [ 6 ] 马伟明. 电力电子系统中的电磁兼容 [M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000
- [ 7 ] 马伟明, 杨青, 胡安, 等. 交直流混合发电供电系统突然短路分析 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(6): 35~39
- [ 8 ] 马伟明, 胡安, 王令蓉. 基于电压波形分析的十二相整流装置故障诊断 [J]. 电工技术学报, 1997, 12(6): 49~54

## AC - DC Power Integration Techniques

Ma Weiming

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**[Abstract]** A novel AC - DC machine is invented on the basis of the proposed new idea of electric power integration, wherein the stator with one set of 3-phase AC winding and another set of 12-phase DC winding, together with a rotor having a d-axis field winding and a q-axis stabilizing winding, is combined with a 12-phase bridge rectifier, an AC exciter with an excitation system, the automatic voltage regulator as well as a cooling system to form an integral whole. Simultaneous AC and DC power supplies with high quality being available, this new generator is especially suitable for self-contained electrical systems, such as those found on aircraft and ships, where good performance and compact size are essential. Mathematical models of the machine are established and calculation and measurement methods of the model parameters are proposed, providing a theoretical basis for solving the key technical problems. Low-frequency oscillations occurring in a synchronous generator-rectifier system are examined, stability criterion of the system is obtained, and technical measures are proposed to ensure system's stable operation. With the AC voltage regulated, the DC voltage floats within an acceptable range, which can be achieved through rational machine design. Due to complete electrical separation of the AC and DC circuits and usage of the properly designed 12-phase DC winding, the AC voltage distortion caused by DC commutation and the DC voltage pulsation are greatly reduced, which considerably improves the EMC of the system. Expressions for the peak current and impact torque following a short-circuit fault at DC side or at both AC and DC sides are derived once the strong nonlinearity of the system is ingeniously handled. The principle and methods for on-line real time fault diagnosis of the diodes in the 12-phase rectifier are proposed so that the state of each diode can be easily judged according to the input/output-voltage waveforms. Based on the achievements of above research, AC - DC generators with high performance have been developed, laying the foundation for integration of self-contained electrical systems.

**[Key words]** electric power integration; double-winding AC - DC generator; 12-phase rectification; simultaneous AC and DC power supply; self-contained electrical system