

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190023

六相整流发电机接地方式对船舶中压电力系统谐波影响

吴本祥, 张晓锋, 张超, 刘少帅, 徐国顺

(海军工程大学, 湖北 武汉 430033)

摘要: 为抑制因单相接地故障而引起的船舶中压电力系统非特征谐波, 以六相整流发电机为例, 研究了其中性点接地方式对谐波的影响。首先, 运用开关函数和对称分量法, 分别得出正常运行时直流电压特征谐波以及故障下非特征谐波计算方法, 再利用直流电压推导出了交流故障电流的谐波表达式。其次, 分析了非故障绕组零序回路, 运用功率平衡原则, 得到接地电阻与非故障绕组零序电压的关系, 分析出接地方式对谐波的影响。最后, 通过 PSCAD/EMTDC 仿真平台和实验验证了所得到的结论, 为船舶中压直流电力系统接地方式的选取提供了参考和依据。

关键词: 船舶中压电力系统; 六相整流发电机; 接地方式; 非特征谐波

Influence of grounding mode of 6-phase generator with rectifier-load on harmonics in shipboard medium voltage power system

WU Benxiang, ZHANG Xiaofeng, ZHANG Chao, LIU Shaoshuai, XU Guoshun
(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to suppress the non-characteristic harmonics in shipboard medium voltage power system caused by single phase grounding fault, the influence of neutral grounding mode of the 6-phase generator with rectifier-load on the harmonics is studied. Firstly, the switching function and method of symmetrical components are used, the calculation methods of characteristic harmonics at normal situation and non-characteristic harmonics in fault situation of DC voltage are obtained respectively, then the harmonics expression of AC fault current is deduced by using DC voltage. Secondly, the zero-sequence loop in fault is analyzed, and the relationship between grounding resistance and non-characteristic harmonics of DC voltage is obtained, and the influence of grounding mode on harmonics is analyzed. Finally, the conclusions are verified by simulation software PSCAD/EMTDC and experiments. The obtained results provide a basis for the selection of grounding mode for shipboard medium voltage power system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607184).

Key words: shipboard medium voltage power system; 6-phase generator with rectifier-load; grounding mode; non-characteristic harmonics

0 引言

随着船舶用电设备的不断增多, 用电容量不断增大, 直流供电系统易于并网、线路损耗小、供电可靠性高等优势逐渐体现, 运用中压直流电力系统为全船供电已被广泛应用^[1]。为了整流得到更高稳定的直流电压, 常常采用多相整流发电机进行供电, 即通过带多套不同相位三相绕组的同步发电机带不控整流桥负载, 通过 12 或 24 脉波整流发电机发电

是船舶中压直流电力系统常见的方式^[2-3]。多脉波整流同步发电机可以减小直流电压的纹波, 有效提高直流侧的电能质量。

对于船舶中压直流电力系统而言, 交流侧的单相接地故障是最常见的故障之一。当系统交流侧的单相接地故障无法及时消除, 系统将带故障运行, 并通过电力电子器件将故障传导到直流侧, 在直流侧形成非特征谐波^[4], 特别是较高的 2 次谐波, 这会对系统造成不小的负面影响, 其主要分为 3 个部分, 1) 增加系统热损耗, 导致热应力增加; 2) 峰值电压上升, 导致绝缘应力升高; 3) 由谐波畸变引起

的设备不正常工作及故障, 这些都会对中压船舶电力系统这样一个独立的电网造成不小的损害^[5-6]。文献[7]中采用 PSASP 程序对特定的换流站进行谐波分析, 得出了交流滤波器在不同组合投入时的非特征谐波含量及过电压。文献[8]中通过对柔性直流配电网交流电流的谐波分析, 得出交流侧采用滤波器接地而直流侧不接地最能抑制高次谐波。但他们的研究对象都不是针对多相整流发电机的, 没有绕组间的故障传递问题。而国内外对于多相整流发电机的研究仍在起步阶段, 对短路故障的研究相对较多, 如匝间短路^[9]、同桥相间短路^[10]、异桥相间短路^[11]、开路故障^[12]等等, 这些故障危害较大, 会直接导致系统停止供电。而对于系统可以带故障运行的情况研究较少, 特别是单相接地故障的研究较少。多相整流发电机发生单相接地故障不同于传统的高压直流输电(High Voltage Direct Current Transmission, HVDC)发生交流侧单相接地故障, 其不同绕组间存在故障传递, 对船舶中压电力系统这种独立系统影响较大, 特别是故障下所产生的较大的非特征谐波, 对整个系统的危害非常大^[13]。

对于船舶中压电力系统来说, 当发电机中性点采取不接地的方式, 系统发生单相接地故障, 尤其是弧光接地时, 振荡所产生的自由电荷不能得到及时的释放, 将造成极大的过电压, 烧损发电机^[14-18]; 而发电机中性点经消弧线圈接地(谐振接地)的方式, 可以通过感性电流补偿容性电流, 达到降低故障电流的目的, 但该方式不仅对过电压的限制不如电阻接地, 而且因为系统分布电容随电网运行工况在不断变化, 难以调节接地电感^[19], 所以船舶中压电力系统往往采用发电机经电阻接地的方法^[20]。

本文以六相整流发电机为例, 在交流侧发生单相接地故障的情况下, 运用开关函数和对称分量法, 分析了多相整流发电机中非故障绕组的零序电压特性, 得出了直流电压和交流电流的非特征谐波与接地电阻的关系。并进行了仿真和实验验证, 所得结论为船舶中压电力系统接地方式的设计和参数整定提供了依据。

1 直流侧电压谐波含量分析

对于船舶中压电力系统来说, 直流侧总电压的电能质量尤为重要, 对推进电机及其他用电设备的影响非常显著。直流电压的电能质量也成了考查船舶中压电力系统的重要指标。

1.1 直流侧电压特征谐波分析

常见的六相整流发电机往往由两套相差 30°相位的三相定子绕组组成, 然后带不控整流桥负载进行供电^[21-22], 如图 1 所示, 用 $V_{a1}—V_{c2}$ 来表示不控整流桥前端交流相电压。

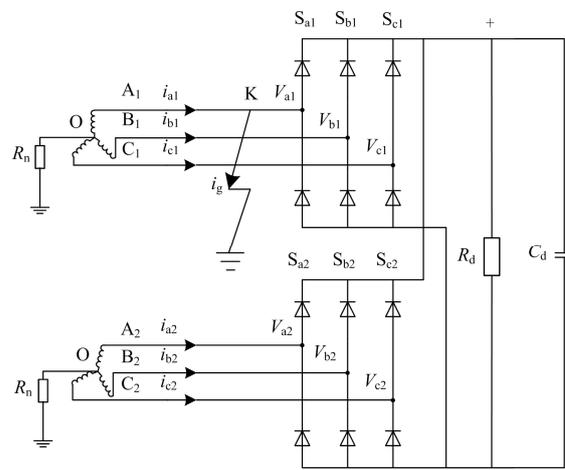


图 1 带六相整流发电机的船舶中压直流系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of shipboard medium voltage DC system with 6-phase generator with rectifier-load

在故障发生之前, 两套绕组的三相电压保持平衡, 对六相电压进行傅里叶变换, 可以将他们表示为

$$\begin{cases} U_{a1} = U_m \cos(\omega t + \frac{\pi(i-1)}{6} + \varphi_{a1}) \\ U_{b1} = U_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi(i-1)}{6} + \varphi_{a1}) \\ U_{c1} = U_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi(i-1)}{6} + \varphi_{a1}) \end{cases} \quad (1)$$

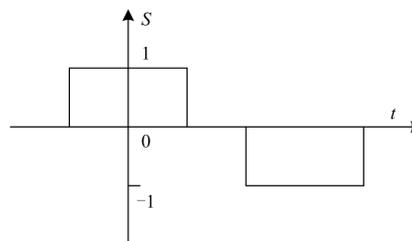
式中: $i=1,2$, 表示第 i 套绕组; U_m 为相电压幅值; φ_{a1} 表示 A_1 相正序电压的初始相位。

所研究的系统为不控整流系统, 可以用开关函数来模拟阀臂的开断, 而直流电压则可以看成是各个交流相电压以开关函数的形式叠加而来^[13], 其表达式为

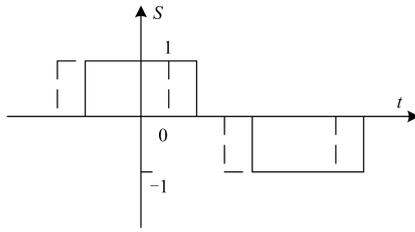
$$U_{dc} = \sum_{i=1}^2 \sum_{x=-1}^1 (S_{ar} U_{ar(x)} + S_{br} U_{br(x)} + S_{cr} U_{cr(x)}) \quad (2)$$

运用对称分量法将相电压分解成正、零、负序, 其中 $x=1,0,-1$ 分别表示正、零、负序电压, i 表示 12 脉波整流的两套绕组; S 代表开关函数。

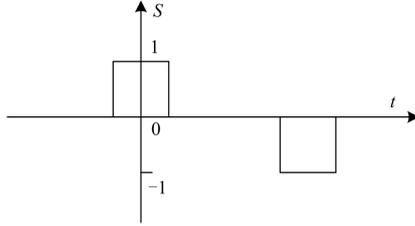
当忽略换相过程, 可以将 A 相的开关函数定义成一个幅值为 1 的偶函数, 如图 2 所示的函数。



(a) 6脉波整流A相开关函数



(b) 两套绕组A相关函数



(c) 12脉波整流A1相关函数

图 2 不控整流桥单相开关函数

Fig. 2 Single phase switching function of uncontrolled rectifier

将其傅里叶级数展开, 则 A₁—C₂ 的开关函数傅里叶级数为

$$\begin{cases} S_{a1} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\omega t \\ S_{b1} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ S_{c1} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} S_{a2} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n(\omega t + \frac{\pi}{3}) \\ S_{b2} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n(\omega t - \frac{\pi}{3}) \\ S_{c2} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n(\omega t + \pi) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $A_n = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{n} \cdot \sin \frac{\pi}{2} \cdot n \cdot \cos \frac{\pi}{6} n$ 。

当系统正常运行时, 交流侧电压保持平衡, 仅含正序分量, 则可由式(2)计算得出

$$U_{dc} = \frac{3}{2} U_m \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \{ A_{(6n-1)} \cdot [(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}) \cos(6n\omega t + \varphi_{a1}) + \frac{1}{2} \sin(6n\omega t + \varphi_{a1})] + A_{(6n+1)} \cdot [(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}) \cos(6n\omega t + \varphi_{a1}) - \frac{1}{2} \sin(6n\omega t + \varphi_{a1})] \} \quad (5)$$

可以看出当系统正常运行时, 直流侧电压仅含有 12n 次谐波, 且谐波次数越高, 它的幅值越低。

1.2 单相接地故障下直流电压非特征谐波分析

当交流侧正常运行时, 系统交流侧各相电压平衡, 交流电压分量中只存在正序电压。但当某一相发生单相接地故障时, 由于两套绕组均产生了零序电压, 且当零序电压不相等时, 六相电压产生了不平衡。

以 A₁ 相发生单相接地故障为例, 则在两套绕组上产生相应的零序电压, 分别用 u_{s1}^0 、 u_{s2}^0 表示, 故障相所在绕组零序电压 $u_{s1}^0 = -U_{a1}$, 而非故障绕组的零序电压 u_{s2}^0 , 其方向与 $-U_{a1}$ 相同, 幅值与发电机中性点接地方式和直流负载有关。当 $u_{s1}^0 \neq u_{s2}^0$ 时, 系统六相电压之间存在不平衡, 从而产生了负序电压。并且 u_{s1}^0 、 u_{s2}^0 相差越大, 交流电压不平衡度越大, 负序电压也就越大^[4]。交流侧六相负序电压表示为

$$\begin{cases} U_{ai(-1)} = U_m^{(-1)} \cos(\omega t + \frac{\pi(i-1)}{6} + \varphi_{a1}) \\ U_{bi(-1)} = U_m^{(-1)} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi(i-1)}{6} + \varphi_{a1}) \\ U_{ci(-1)} = U_m^{(-1)} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi(i-1)}{6} + \varphi_{a1}) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $U_m^{(-1)}$ 表示系统交流侧负序电压的幅值。利用对称分量法, 将零序和负序电压代入谐波计算公式(2)计算, 发现零序电压与开关函数的乘积相加为零, 即零序电压的大小对谐波含量没有影响。

负序电压与开关函数的乘积, 可以计算得直流电压中的非特征谐波含量为

$$U_{dc}^{(-1)} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{3}{2} U_m^{(-1)} A_{(6n-1)} \cdot \{ \cos[(6n-2)\omega t + \varphi_{a1}^{(-1)}] + \sin[(6n-2)\omega t + \varphi_{a1}^{(-1)}] \} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{3}{2} U_m^{(-1)} A_{(6n+1)} \cdot \{ \cos[(6n+2)\omega t + \varphi_{a1}^{(-1)}] - \sin[(6n+2)\omega t + \varphi_{a1}^{(-1)}] \} \quad (7)$$

式中: $U_{dc}^{(-1)}$ 表示系统直流电压因负序分量而引起的非特征谐波; $\varphi_{a1}^{(-1)}$ 表示 A₁ 相负序电压初始相位角。由式(7)可以看出系统的非特征谐波为偶次谐波, 特别是低次的偶次谐波较大, 如 2 次和 4 次谐波, 这将会对系统造成较大的损害。

2 故障下交流侧谐波电流

将不控整流桥看成输出直流电压的恒压源模型, 从而可以得出固定负载下的直流电流。在船舶中压电力系统中, 发电机端的交流侧电流可以看成是不控整流桥对直流电流的调制^[13], 有

$$i_{b1} = i_{dc} \cdot S_{b1} = \frac{U_{dc}}{R_d} \cdot S_{b1} = \frac{U_{dc}^{(1)} + U_{dc}^{(-1)}}{R_d} \cdot S_{b1} \quad (8)$$

将直流电压中的谐波分解成由特征谐波分量 $U_{dc}^{(1)}$ 和负序电压引起的非特征谐波分量 $U_{dc}^{(-1)}$, 当系统正常运行时, 交流各相电压平衡, 直流电压只含有特征谐波分量, 即 $12n$ 次谐波, 计算得到正常运行情况下, 交流侧电流谐波为 $6n+1$ 次, 如 1 次、5 次、7 次、11 次、13 次等。

而每一相交流电流中的非特征谐波都是由直流电压中的非特征谐波分量引起的, 以 B_1 相为例计算其电流中的非特征谐波, 可得主要的低频非特征谐波分量为

$$\begin{aligned} n=1, \quad i_{b1}^{(-1)} &= \frac{3\sqrt{2}}{4} \frac{U_m^{(-1)}}{R_d} \{A_1 A_5 [\sin(3\omega t + \varphi') + \\ &\quad \sin(5\omega t + \varphi')] + \\ &\quad A_1 A_7 [\cos(7\omega t + \varphi') + \cos(9\omega t + \varphi')]\} \\ n=2, \quad i_{b1}^{(-1)} &= \frac{3\sqrt{2}}{4} \frac{U_m^{(-1)}}{R_d} \{A_2 A_{11} [\sin(8\omega t + \varphi') + \\ &\quad \sin(12\omega t + \varphi')] + \\ &\quad A_2 A_{13} [\cos(12\omega t + \varphi') + \cos(16\omega t + \varphi')]\} \\ &\quad \vdots \end{aligned} \quad (9)$$

式中, A_n 与之前开关函数幅值一致。可以看出故障下产生了 3 次、5 次、7 次、9 次等谐波, 且由 A_n 表达式可知, 当谐波次数越高, 幅值越小。

3 非故障绕组零序电压与接地电阻关系

针对六相整流发电机中带有不控整流桥系统, 本文采用了等效零序回路的方法分析非故障绕组的零序电压。故障下的相电压通过不控整流桥时可以将其等效为零序电压与原电压的叠加, 而分离出来的零序电压通过不控整流桥时, 可以看成分段的零序电压叠加在直流电压上。虽然正弦波形会产生畸变, 但其峰值不会因通过电力电子器件而改变。依然可以运用分压公式求得非故障绕组的零序电压幅值。

非故障绕组的零序回路如图 3 所示, 其中 R_n 为绕组中性点接地电阻, R_d 表示直流阻性负载, C_d 表示直流容性负载。由图 3 中可以看出, 非故障绕组的零序回路经过直流侧通过故障绕组的接地相流入大地, 所以零序电流及非故障绕组的零序电压 u_{s2}^0 不仅与接地电阻 R_n 有关, 且与直流负载 R_d 、 C_d 相关。

将整个系统的输入分解为正常相电压和零序电压的叠加, 假设零序电压源存在于接地点 K 处, 则系统零序电压作用下的简化回路如图 4 所示。

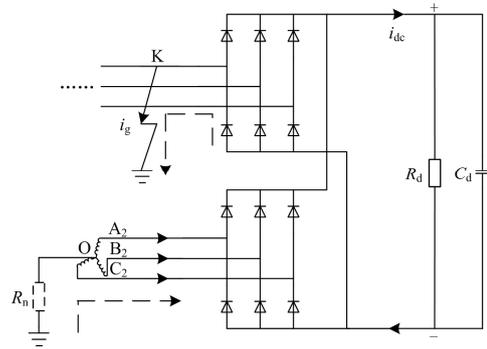


图 3 非故障绕组零序回路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of zero sequence circuit of non fault winding

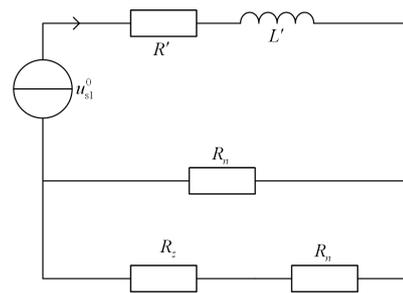


图 4 12 相整流发电机零序回路简化图

Fig. 4 Simplified diagram of zero sequence circuit of 12-phase generator with rectifier load

其中 R' 和 L' 为线路等效电阻和电感, R_z 为直流侧负载电阻 R_d 折算到零序回路上的等效电阻。计算中忽略数量级较小的发电机分布电容、线路电阻 R 和电感 L 。得出各套绕组的零序电压方程为

$$u_{s2}^0 \approx \frac{-U_{a1} \cdot R_n}{R_z + R_n} \quad (10)$$

可以看出当其他量固定时, 零序电压 u_{s2}^0 是随着接地电阻 R_n 增大而增大的, 且其幅值最终趋近于相电压。

式(10)中 R_z 可以通过功率平衡法进行定量计算, 由于篇幅原因, 本文只做定性分析。值得一提的是, 当直流负载在零序回路中的交流阻抗越大, 等效到交流侧电阻 R_z 越大。而直流负载的交流阻抗值为

$$Z_d = \left| \frac{R_d \cdot \frac{1}{j\omega C_d}}{R_d + \frac{1}{j\omega C_d}} \right| \quad (11)$$

可以看出当船舶电力系统带大支撑电容运行时, 即 $\left| \frac{1}{j\omega C_d} \right| \ll R_d$, 等效电阻 R_z 趋近于 0, 此时非

故障绕组零序电压 u_{s2}^0 幅值趋近于故障绕组零序电压 u_{s1}^0 ，负序电压几乎为零，此时非特征谐波也几乎为零。这也就解释了当直流侧存在较大数量级的差模电容时，系统线路上非特征谐波含量非常小的原因。

所以由式(10)和式(7)、式(9)得出，当系统固定负载且负载存在一定交流阻抗时，发电机中性点接地电阻 R_n 越小，非故障绕组的零序电压 u_{s2}^0 也就越小，系统直流电压和交、直流电流的非特征谐波就越大；反之 R_n 越大，系统直流电压和交、直流电流的非特征谐波就越小。所以在十二相整流发电机接地电阻的选择上，应在能够起到接地效果的基础上尽可能地选择较大的电阻接地，这样能够有效地抑制非特征谐波。

4 仿真和实验验证

通过 PSCAD/EMTDC 仿真软件进行仿真模拟，分别对发电机中性点经不同电阻接地进行仿真，比较在单相接地故障时直流电压 U_{dc} 的谐波含量。其中仿真参数与具备条件的实验参数一致，直流侧固定负载 R_d 为 392Ω ，接地电阻 R_n 分别设置为 49Ω 、 98Ω 和 196Ω 。在单相接地故障发生后系统在直流侧产生了非特征谐波，其中较为明显的为 2 次和 4 次谐波，且接地电阻 R_n 越小，非特征谐波越大，如图 5 所示，这与理论分析一致。

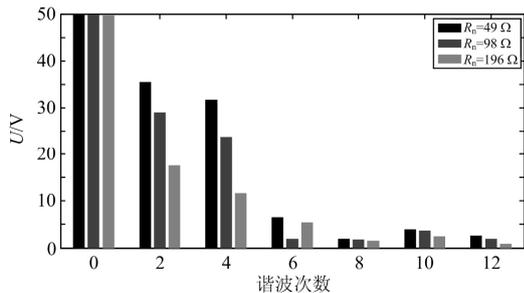


图 5 不同接地电阻下故障直流电压 U_{dc} 仿真谐波含量
Fig. 5 Simulation of harmonic of DC voltage U_{dc} with different grounding resistances during fault

同样通过 PSCAD/EMTDC 仿真平台进行谐波分析，分析六相整流发电机单相接地故障下，不同接地电阻大小对交流电流谐波的影响。以 B_1 相电流 I_{b1} 为例，得出其谐波如图 6 所示。

为了进一步验证仿真分析结果的正确性，用一台低转速的六相同步发电机带整流桥模块模拟六相整流发电机进行实验，在同步发电机的某一相上设置单相接地故障可控开关，进行故障实验。实验平台如图 7 所示，发电机主要参数见表 1。

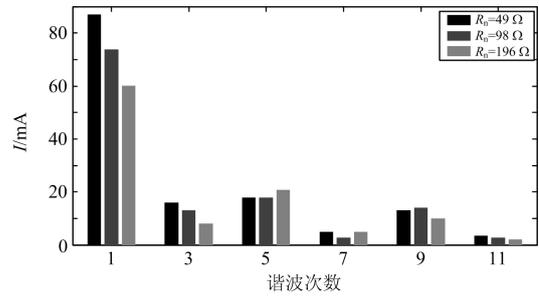


图 6 不同接地电阻下故障交流电流 I_{b1} 仿真谐波含量
Fig. 6 Simulation of harmonic of AC current I_{b1} with different grounding resistances during fault



(a) 同步发电机及故障设置



(b) 整流桥及示波器

图 7 实验平台照片

Fig. 7 Photos of experiment platform

表 1 12 相整流同步发电机主要参数

Table 1 Main parameters of the synchronous machine

参数	数值
额定输出功率/kW	324
额定输出电压/V	1 100
额定输出电流/A	42.5
额定频率/Hz	12
额定转速/(r/min)	180

改变发电机绕组中性点接地电阻的阻值, 观察直流过电压波形 U_{dc} , 如图 8 所示为接地电阻分别取 $49\ \Omega$ 、 $98\ \Omega$ 、 $196\ \Omega$ 时的直流电压波形, 并记录数据, 分析其谐波含量如图 9 所示。

从直流电压波形可以看出, 故障下产生了较大的谐波, 甚至导致直流侧存在一定程度的过电压。而从谐波分析中得知, 低次非特征谐波较大, 尤其是 2 次和 4 次谐波, 且随着接地电阻值的增大而减小, 这一趋势与理论分析和仿真一致。

从仿真和实验对直流电压的谐波分析中, 可以看出谐波含量基本一致, 实验与仿真结果存在的误差, 可能是由于仿真模型中对发电机内部参数设置不准确导致的。

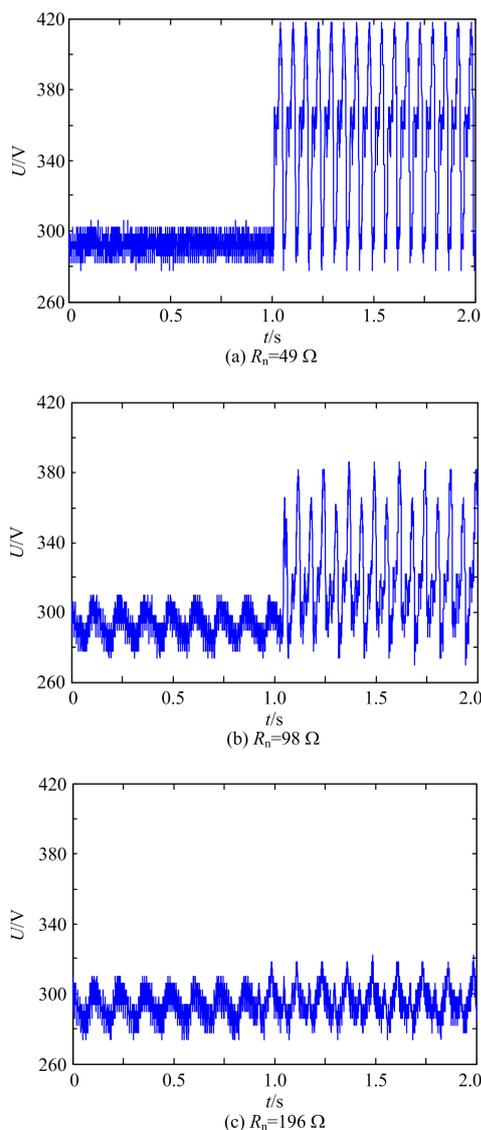


图 8 不同接地电阻下的直流电压 U_{dc} 实验波形
Fig. 8 Experiment waveforms of DC voltage U_{dc} with different grounding resistances

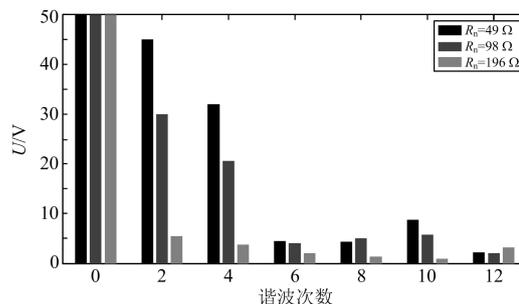
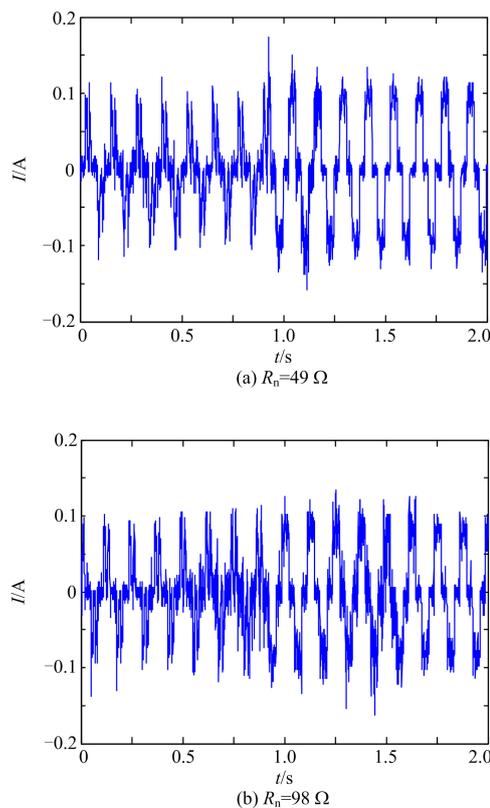


图 9 不同接地电阻下故障直流电压 U_{dc} 实验谐波含量
Fig. 9 Experiment harmonic content of DC voltage U_{dc} with different grounding resistances

同样选取发电机交流侧 B_1 相的电流 I_{b1} 进行分析, 在发电机中性点采用不同接地电阻时 I_{b1} 的波形如图 10 所示, 设置在 1 s 左右 A_1 相接地故障发生。对他们分别进行 FFT 变换, 得到其故障下的谐波分量比较图, 如图 11 所示。

从图 10、图 11 可以看出实验中随着接地电阻的增大, 故障后交流电流波形幅值明显减小, 由于交流电流的特征谐波和非特征谐波均包含 5 次、7 次、11 次谐波, 所以发电机中性点接地电阻对这些谐波的影响并不呈现单调趋势。但对基波和 3 次谐波仍存在影响, 可以看出接地电阻越大, 基波和 3 次谐波的含量就越小, 这也与仿真结果一致。



(b) $R_n=98\ \Omega$

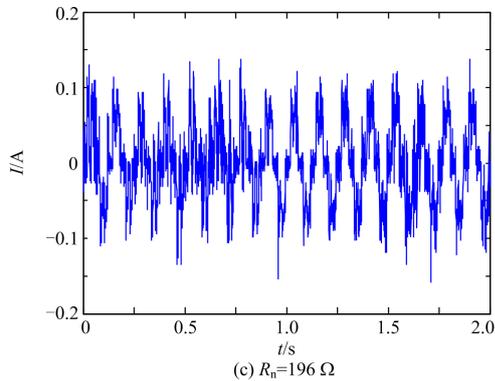


图 10 不同接地电阻下的交流电流 I_{b1} 实验波形

Fig. 10 Experiment waveforms of AC current I_{b1} with different grounding resistances

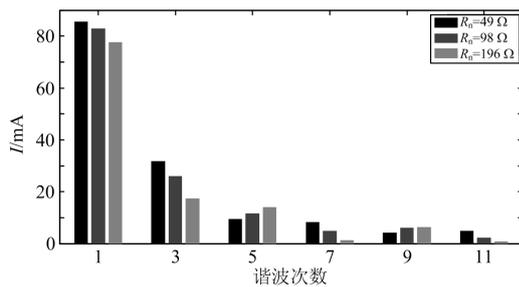


图 11 不同接地电阻下故障直流电压 I_{b1} 实验谐波含量

Fig. 11 Experiment harmonic content of AC current I_{b1} with different grounding resistances

5 结论

在实际船舶电力系统中，低次谐波对于系统的危害非常大，本文分析了六相整流发电机接地方式与谐波的影响，得出了以下结论：

1) 六相整流发电机输出的直流电压会存在 $12n$ 次特征谐波，且谐波次数越高，其幅值越低，高次谐波几乎可以忽略不计。

2) 在船舶中压电力系统中，当存在接地的六相整流发电机发生单相接地故障后，在系统的直流电压会产生一定的非特征谐波，其中 2 次、4 次谐波较为明显。

3) 采用发电机中性点经电阻接地时，接地电阻越小，非故障绕组中的零序电压也就越小，非特征谐波的含量越大。同时直流电压的非特征谐波也会造成交流侧电流的非特征谐波。

文本的研究以六相整流发电机为例，从接地方式的角度，为抑制多相整流发电机在故障下的非特征谐波提供了途径，同时也为船舶中压电力系统的接地方式选择提供了依据。

参考文献

- [1] 付立军, 刘鲁锋, 王刚, 等. 我国舰船中压直流综合电力系统研究进展[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(1): 72-79. FU Lijun, LIU Lufeng, WANG Gang, et al. The research progress of the medium voltage DC integrated power system in China[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(1): 72-79.
- [2] 马伟明. 交直流电力集成技术[J]. 中国工程科学, 2002, 4(12): 53-59. MA Weiming. AC-DC power integration techniques[J]. Engineering Science, 2002, 4(12): 53-59.
- [3] 马伟明. 电力集成技术[J]. 电工技术学报, 2005, 20(1): 16-20. MA Weiming. Power system integration technique[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(1): 16-20.
- [4] 马玉龙, 肖湘宁, 姜旭. 交流系统接地故障对 HVDC 的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 145-149. MA Yulong, XIAO Xiangning, JIANG Xu. Analysis of the impact of AC systems single-phase earth fault on HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 145-149.
- [5] ZOU G B, HUANG Q, SONG S L, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 370-378. DOI: 10.1186/s41601-017-0058-9.
- [6] 张战彬, 翟红霞, 徐华博, 等. 光伏电站多逆变器并网系统输出谐波研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 142-146. ZHANG Zhanbin, ZHAI Hongxia, XU Huabo, et al. Study on output harmonic of multi-inverter grid-connected in photovoltaic plant[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 142-146.
- [7] 段锐敏, 刘河林, 闫涵, 等. 含混合直流异步联网的云南电网谐振特性研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(3): 55-60. DUAN Ruimin, LIU Helin, YAN Han, et al. Study on resonance characteristics of Yunnan Power Grid with hybrid DC asynchronous interconnection systems[J]. Smart Power, 2018, 46(3): 55-60.
- [8] 吴峻, 武迪, 朱金大, 等. 多端柔性直流配电网接地方式设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2551-2560. WU Jun, WU Di, ZHU Jinda, et al. Grounding method design of multi-terminal flexible DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2551-2560.
- [9] 孙宇光, 黄子果, 陈丽, 等. 十二相整流同步发电机定

- 子匝间短路故障计算[J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 57-64.
- SUN Yuguang, HUANG Ziguang, CHEN Li, et al. Calculation of stator winding inter-turn short circuit in 12-phase synchronous generators with rectifier load system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(3): 57-64.
- [10] 孙宇光, 黄子果, 王善铭, 等. 十二相整流同步发电机同组星形连接绕组的相间短路故障[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 153-158.
- SUN Yuguang, HUANG Ziguang, WANG Shanming, et al. Phase-to-phase short circuit fault between same group of star-connected phase windings in twelve-phase synchronous generator with rectifier load system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 153-158.
- [11] 孙宇光, 黄子果, 魏锟, 等. 十二相整流同步发电机系统异桥相间短路的故障分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 889-897.
- SUN Yuguang, HUANG Ziguang, WEI Kun, et al. Analysis of stator internal phase-to-phase short circuit between different bridge-rectifiers in the 12-phase synchronous generator with rectifier-load system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 889-897.
- [12] 吴新振, 张伟玲, 董海涛, 等. 十二相整流发电机二极管开路的故障运行分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 157-163.
- WU Xinzen, ZHANG Weiling, DONG Haitao, et al. Analysis of diode-open fault operation for 12-phase rectifier generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 157-163.
- [13] HU L H, YACAMINI R. Harmonic transfer through converters and HVDC links[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1992, 7(3): 514-525.
- [14] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波. 基于 MMC 的环状直流配网在不同接地方式下的故障特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 1-10.
- DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo. Analysis on fault characteristics of MMC-based ring DC distribution networks under different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 1-10.
- [15] 毕大强, 王祥珩, 王维俭. 基于 3 次谐波电压故障暂态分量的定子单相接地保护[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(13): 45-49.
- BI Daqiang, WANG Xiangheng, WANG Weijian. Protection scheme based on fault transient component of third harmonic voltage for stator ground fault of generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(13): 45-49.
- [16] 要焕年. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [17] 王健, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 光伏电站内用直流微电网的接地方式分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 164-170.
- WANG Jian, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Analysis of grounding mode of DC micro grid in PV station[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 164-170.
- [18] 黄少锋, 贾文超. 大型汽轮发电机定子单相接地故障定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 35-40.
- HUANG Shaofeng, JIA Wenchao. A new fault location method for stator single-phase grounding fault in large turbine generator[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 35-40.
- [19] 贾晨曦, 杨龙月, 杜贵府. 全电流补偿消弧线圈关键技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 145-154.
- JIA Chenxi, YANG Longyue, DU Guifu. Review of key technologies on full current compensation are suppression coil[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 145-154.
- [20] 张晓锋, 李耕, 陈亮, 等. 船舶交流电力系统电制选择与工作接地[J]. 海军工程大学学报, 2017, 29(2): 85-91.
- ZHANG Xiaofeng, LI Geng, CHEN Liang, et al. Voltage level selection and working grounding designing for shipboard AC power system[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2017, 29(2): 85-91.
- [21] SHENG L, YINZHONG C. Modeling of a twelve-phase synchronous machine using Matlab/SimPowerSystems [C] // International Conference on Electronics, IEEE, September 9-11, 2011, Ningbo, China.
- [22] DEJIA Z, ZHENGMING Z, SHANMING W, et al. Vector control for a twelve-phase synchronous motor[C] // International Conference on Electrical Machines & Systems, IEEE, October 8-11, 2007, Seoul, South Korea.

收稿日期: 2019-01-07; 修回日期: 2019-03-21

作者简介:

吴本祥(1991—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统安全运行及自动化; E-mail: wc_520@foxmail.com

张超(1979—), 男, 通信作者, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统安全运行及接地保护技术。E-mail: 13396050578@189.cn

(编辑 周金梅)