

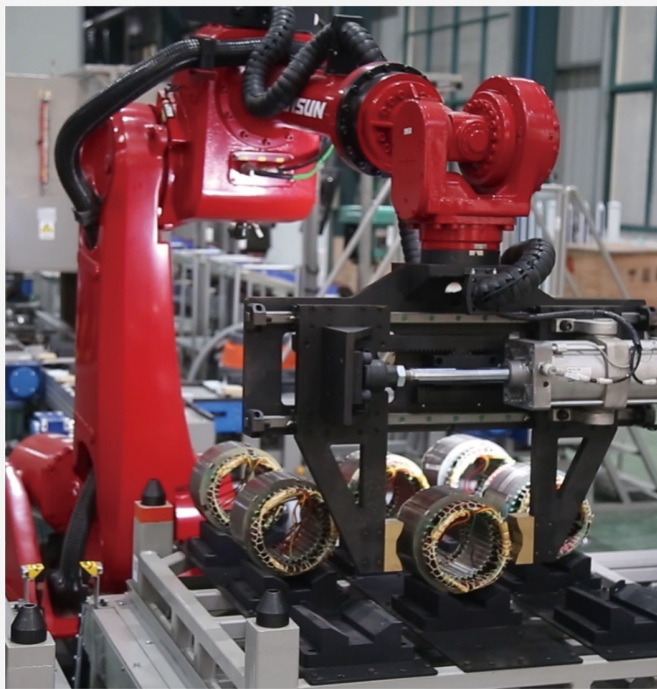
本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

徐成, 吴本祥.
船舶中压直流电力系统接地方式对
直流纹波影响研究.
电机与控制应用, 2021, 48(11): 80.



中国智能制造系统解决方案供应商联盟 (成员)
上海智能制造系统解决方案供应商 (首批)

电机·智能制造



咨询服务

规划设计

设计制造

信息化系统

项目实施



扫码联系
我们

联系人: 黄先锋 手机: 13501892388
上海电器科学研究所 (集团) 有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司
上海市武宁路505号9号楼6层

船舶中压直流电力系统接地方式对直流纹波影响研究

徐 成¹, 吴本祥²

(1. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200010;

2. 海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 单相接地故障作为一种常见电气故障, 会使船舶中压直流电力系统的直流电压纹波产生畸变, 影响系统正常运行。以中压直流电力系统的单相接地故障为背景, 研究了整流发电机中性点接地方式对纹波的影响。首先运用对称分量法和开关函数法, 分别计算了直流电压的正常纹波次数与故障下纹波次数, 并推导出故障下直流电压中交流分量的解析表达式。然后, 通过分析绕组间的零序回路, 得出了故障绕组零序电压与接地方式之间的关联, 从而进一步得到接地方式对直流纹波的影响。最后, 通过 PSCAD 与 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建模型, 进行仿真实验, 为舰船中压直流系统整流发电机接地方式的选取提供参考依据。

关键词: 船舶电力系统; 中压直流; 接地方式; 纹波次数

中图分类号: TM 33 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)11-0080-06

doi: 10.12177/emca.2021.120

Influence of Grounding Mode on DC Ripple in Ship Medium Voltage DC Power System

XU Cheng¹, WU Benxiang²

(1. Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200010, China;

2. College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: As a common electrical fault, single-phase grounding fault will distort the DC voltage ripple of ship medium voltage DC power system and affect the normal operation of the system. Taking the single-phase grounding fault in medium voltage DC power system as the research background, we study the influence of neutral grounding mode of rectifier generator on ripple. Firstly, using the symmetrical component method and the switching function method, the normal ripple order of DC voltage and the ripple order under fault are calculated respectively, and the analytical expression of AC component in DC voltage under fault is derived. Then, by analyzing the zero sequence circuit between windings, the correlation between the zero sequence voltage of fault winding and grounding mode is obtained, which can be used to further study the influence of grounding mode on DC ripple. Finally, the model is built by PSCAD and MATLAB/Simulink simulation software for verification. This research can provide a reference basis for the selection of grounding mode of rectifier generator in ship medium voltage DC system.

Key words: ship power system; medium voltage DC; grounding mode; order of ripple wave

收稿日期: 2021-08-25; 收到修改稿日期: 2021-10-25

作者简介: 徐 成(1986—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电气工程及其自动化。

吴本祥(1991—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电气工程及其自动化。

0 引言

传统船舶中压交流系统存在能量损耗大、功率密度低、并网困难等缺点。自 20 世纪末以来,随着电力电子技术的发展,通过整流发电机进行供电的船舶中压直流电力系统逐渐走入人们视野。通过直流母线对全船进行供电,减少了电制转化过程,极大地提升了整个系统的效率和能源密度,节省了输送时间和空间^[1-2]。

然而,船舶中压直流电力系统仍在研究之中,许多关键技术仍不成熟,相关标准仍不健全。对于接地方式而言,船舶中压直流电力系统依靠整流发电机供电,其中性点接地方式不能直接参照传统交流系统接地方式。同时,由于系统中存在大量电力电子器件,因此对供电的连续性、安全性有着更高的要求。交流侧单相接地故障是该电力系统最常见的故障之一,会直接导致系统产生非特征纹波,从而影响系统中压直流的纹波特性,对系统的安全性造成极大的隐患^[3]。因此,开展交流侧接地方式对纹波的影响的研究,可以提高该系统的安全性与实用性。研究中压直流电力系统交流侧接地方式对故障下的系统直流纹波产生的影响,可为船舶电力系统接地方式的选取提供参考。舰船电力系统较少采用谐振接地^[4],可以通过电阻接地的形式进行接地方式分析,通过阻值的整定体现接地方式的选取。

对于直流纹波的分析本质上是对直流电压中交流分量的分析,可以借鉴相关谐波分析的方法。国内外学者采用坐标变换法、动态向量法、扩展频域法等^[5-7]广泛开展了谐波研究,但对于带整流模块的中压直流系统的谐波研究相对较少。文献[8]对直流输电系统的非特征谐波进行了研究,利用导纳矩阵的方法对单个三相六脉冲谐波装置的非特征谐波含量进行了计算,阐明了非特征谐波的危害。文献[9]对柔性直流配电网交流电流的谐波进行分析,总结出交流侧采用滤波器接地而直流侧不接地抑制高次谐波的效果较好的结论,但其研究对象主要是陆地柔性电网,其结构与船舶电力系统不相同。文献[10-11]分别介绍了谐波的主动抑制和被动抑制两种方式,对本文均有借鉴意义。

本文以三相和十二相整流发电机为例,运用

开关函数法和对称分量法,对中压直流系统的特征纹波和故障下的非特征纹波进行分析。在交流侧发生单相接地故障的情况下,分析了多相整流发电机中非故障绕组的零序电压特性,得出了直流电压的非特征纹波与交流侧接地电阻的关系,并进行了仿真验证。所得结论可为船舶中压电力系统接地方式的设计和参数整定提供依据。

1 三相整流系统直流电压纹波分析

对于船舶中压电力系统来说,整流后的直流电压品质是衡量系统好坏的重要标准,而直流电压纹波次数和幅值则是电压品质的关键指标。

1.1 直流电压特征纹波分析

常见的带三相整流发电机的船舶中压直流系统结构如图 1 所示,由交流三相绕组和不控整流桥供电。

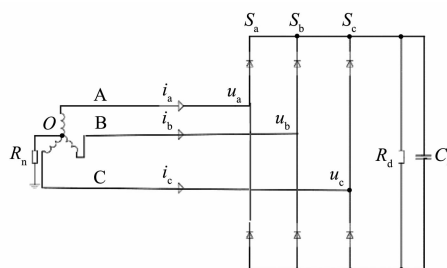


图 1 带三相整流发电机的船舶中压直流系统示意图

在正常运行情况下,发电机交流侧的三相电压相位差均为 120° ,其表达式为

$$\begin{cases} u_a = U_m \cos(\omega t + \varphi_a) \\ u_b = U_m \cos\left(\omega t + \varphi_a - \frac{2}{3}\pi\right) \\ u_c = U_m \cos\left(\omega t + \varphi_a + \frac{2}{3}\pi\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_m 为相电压幅值; φ_a 为 A 相初相位。

针对不控整流桥模型,可以通过定义开关函数的方法来实现电位的传递^[12]:当 A 相对应整流桥的上桥臂导通时,该相开关函数 $S_a = 0$;下桥臂导通时, $S_a = 1$ 。

直流电压可以看作交流电压经过开关函数调制后的叠加^[13]:

$$u_{dc} = S_a u_a + S_b u_b + S_c u_c \quad (2)$$

运用对称电压分量计算方法,将三相交流电压对称分解表示为正序电压、零序电压和负序电压,以 $x=-1, 0, 1$ 区分,即

$$u_{dc} = \sum_{x=-1}^1 [S_a u_{a(x)} + S_b u_{b(x)} + S_c u_{c(x)}] \quad (3)$$

由于换相的时间较短,可以将其忽略,将开关函数视作幅值为 1 的函数,如图 2 所示。

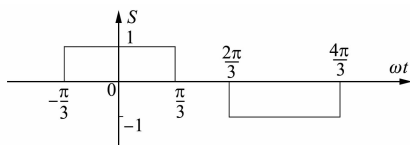


图2 三相整流下的 A 相关关函数

将该偶函数公式化,按照傅里叶级数三角展开形式展开,可得

$$S_a = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t) \quad (4)$$

通过傅里叶变换,可以得到 A_n 的表达式: $A_n = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{n} \cdot \sin \frac{\pi n}{2} \cos \frac{\pi n}{6}$ 。

同理可以得到交流侧每一相的开关函数的傅里叶表达形式:

$$\begin{cases} S_a = A_n \cos(n\omega t) \\ S_b = A_n \cos\left[n\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \\ S_c = A_n \cos\left[n\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \end{cases} \quad (5)$$

在发电机正常工作的情况下,交流侧电压没有零序与负序分量,因此将式(1)和式(5)代入式(2)可得:

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

由式(6)得到结论:在发电机未发生故障的情况下,三相整流发电机的直流侧电压纹波中只存在 $6n$ 次分量,并且根据系数 A_n 的表达式可知, n 越大纹波幅值越小。

1.2 单相接地故障下直流电压非特征纹波分析

当该发电机发生单相接地故障时,系统三相电压将失去平衡。此时三相交流电压产生负序分量,可表示为

$$\begin{cases} u_a^{(-1)} = U_m^{(-1)} \cos[\omega t + \varphi_a^{(-1)}] \\ u_b^{(-1)} = U_m^{(-1)} \cos\left[\omega t + \varphi_a^{(-1)} + \frac{2}{3}\pi\right] \\ u_c^{(-1)} = U_m^{(-1)} \cos\left[\omega t + \varphi_a^{(-1)} - \frac{2}{3}\pi\right] \end{cases} \quad (7)$$

式中: $U_m^{(-1)}$ 为发电机交流侧负序电压幅值; $\varphi_a^{(-1)}$ 为 A 相负序电压初相位。

用对称分量法,将式(1)和式(7)代入式(2),化简可得

$$U_{dc}^{(-1)} = \frac{3}{2} U_m^{(-1)} \sum_{n=1}^{\infty} \{A_{(6n+1)} \cdot \cos[(6n+2)\omega t - \varphi_a^{(-1)}] + A_{(6n-1)} \cdot \cos[(6n-2)\omega t + \varphi_a^{(-1)}]\} \quad (8)$$

式中: $U_{dc}^{(-1)}$ 为系统直流电压非特征分量。

通过式(8)发现:三相整流发电机的交流侧发生单相接地故障时的非特征纹波为 $6n \pm 2$ 次的偶数次纹波,其中低阶偶数次纹波(如 2 次和 4 次纹波)幅值较大,将给发电机带来不可忽视的影响。

2 十二相整流系统直流电压纹波分析

2.1 直流电压特征纹波分析

在正常运行的情况下,十二相发电机的电压会维持在平衡状态,表示为

$$\begin{cases} u_{ak} = U_m \cos\left[\omega t + \varphi_{a1} + \frac{\pi(k-1)}{12}\right] \\ u_{bk} = U_m \cos\left[\omega t + \varphi_{a1} - \frac{2}{3}\pi + \frac{\pi(k-1)}{12}\right] \\ u_{ck} = U_m \cos\left[\omega t + \varphi_{a1} + \frac{2}{3}\pi + \frac{\pi(k-1)}{12}\right] \end{cases} \quad (9)$$

式中: φ_{a1} 表示 A1 相正序电压的初始相位; $k=1, 2, 3, 4$ 表示第 k 套绕组。

直流电压表达式为

$$u_{dc} = \sum_{k=1}^4 \sum_{x=-1}^1 [S_{ak} u_{ak(x)} + S_{bk} u_{bk(x)} + S_{ck} u_{ck(x)}] \quad (10)$$

十二相整流系统中,如不考虑相相交换的时间,单相的开关函数图像为图 3 所示。

将该函数按傅里叶级数的三角展开形式展开,得到 A1 相关关函数的傅里叶展开式:

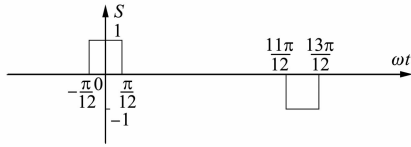


图3 十二相整流下的A1相开关函数

$$S_{a1} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\omega t \quad (11)$$

$$\text{其中: } A_n = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{n} \cdot \sin \frac{\pi n}{2} \cdot \cos \frac{5\pi n}{6}.$$

同理,可以得到交流侧其余各相的傅里叶表达式:

$$\begin{cases} S_{ak} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \left[n \left(\omega t + \frac{\pi(k-1)}{12} \right) \right] \\ S_{bk} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \left[n \left(\omega t + \frac{\pi(k-1)}{12} - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ S_{ck} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \left[n \left(\omega t + \frac{\pi(k-1)}{12} + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \end{cases} \quad (12)$$

在发电机正常工作的情况下,交流侧电压没有零序与负序分量,因此将式(9)和式(12)代入式(10)可得直流电压的计算式:

$$\begin{cases} U_{dc(1)} = \frac{3}{2} U_m \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_{(6n-1)} \cdot \cos(6n\omega t + \varphi_{a1}) + A_{(6n+1)} \cdot \cos(6n\omega t - \varphi_{a1}) \right] \\ U_{dc(2)} = \frac{3}{2} U_m \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_{(6n-1)} \cdot \cos \left(6n\omega t + \frac{6n\pi}{12} + \varphi_{a1} \right) + A_{(6n+1)} \cdot \cos \left(6n\omega t + \frac{6n\pi}{12} - \varphi_{a1} \right) \right] \\ U_{dc(3)} = \frac{3}{2} U_m \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_{(6n-1)} \cdot \cos \left(6n\omega t + \frac{12n\pi}{12} + \varphi_{a1} \right) + A_{(6n+1)} \cdot \cos \left(6n\omega t + \frac{12n\pi}{12} - \varphi_{a1} \right) \right] \\ U_{dc(4)} = \frac{3}{2} U_m \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_{(6n-1)} \cdot \cos \left(6n\omega t + \frac{18n\pi}{12} + \varphi_{a1} \right) + A_{(6n+1)} \cdot \cos \left(6n\omega t + \frac{18n\pi}{12} - \varphi_{a1} \right) \right] \end{cases} \quad (13)$$

将此式化简并进一步计算可得十二相整流发电机的直流电压的各分量表达式:

$$U_{dc} = 6U_m \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[A_{(24n+1)} \cdot \cos(24n\omega t - \varphi_{a1}) + \right. \right.$$

$$\left. A_{(24n-1)} \cdot \cos(24n\omega t + \varphi_{a1}) \right\} \quad (14)$$

由式(14)可以得到结论:当系统正常运行时,十二相整流发电机直流侧电压只存在 $24n$ 次纹波分量,并且根据 A_n 的表达式得到, n 越大纹波幅值越小。

2.2 单相接地故障下直流电压非特征纹波分析

假设整流发电机交流侧A1相单相接地故障,则4套绕组均会产生零序电压,且不一定相等。假设故障绕组的零序电压为 u_{s1}^0 ,与故障套组并联的绕组零序电压为 u_{s2}^0 ,此时有 $u_{s1}^0 = -U_{a1}$ 。当 $u_{s1}^0 \neq u_{s2}^0$ 时,系统相电压之间存在不平衡,从而产生负序电压。并且 u_{s1}^0 与 u_{s2}^0 相差越大,系统不平衡度越大,负序电压也就越大^[13]。

交流侧负序电压表示为

$$\begin{cases} U_{ak(-1)} = U_m^{(-1)} \cos \left(\omega t + \frac{\pi(k-1)}{6} + \varphi_{a1} \right) \\ U_{bk(-1)} = U_m^{(-1)} \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi(k-1)}{6} + \varphi_{a1} \right) \\ U_{ck(-1)} = U_m^{(-1)} \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi(k-1)}{6} + \varphi_{a1} \right) \end{cases} \quad (15)$$

将负序电压代入式(10),可以得到直流电压中的非特征纹波含量为

$$\begin{aligned} U_{dc}^{(-1)} &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{3}{2} U_m^{(-1)} A_{(6n-1)} \cdot \\ &\quad \{ \cos[(6n-2)\omega t + \varphi_{a1}^{(-1)}] + \\ &\quad \sin[(6n-2)\omega t + \varphi_{a1}^{(-1)}] \} + \\ &\quad \sum_{n=0}^{\infty} \frac{3}{2} U_m^{(-1)} A_{(6n+1)} \cdot \{ \cos[(6n+2)\omega t + \varphi_{a1}^{(-1)}] - \\ &\quad \sin[(6n+2)\omega t + \varphi_{a1}^{(-1)}] \} \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $\varphi_{a1}^{(-1)}$ 为A1相负序电压初始相位角。

由式(16)可以看出系统的非特征纹波为偶数次纹波,其中低阶偶数次纹波(如2次和4次纹波)幅值较大,将对系统造成较大的损害。

3 直流纹波与接地电阻关系

非特征纹波幅值 $U_{dc}^{(-1)}$ 与系统交流侧不平衡度正相关,而系统交流侧不平衡度可以通过十二相整流发电机4套绕组的零序电压不平衡度进行定性分析。因此,需要对故障下的零序回路进行分析,将整个系统的输入分解为正常相电压和零序电压的叠加。以第一套绕组中的某一相发生单

相接地故障为例开展分析。

发生故障的绕组零序电压 u_{10} , 为了计算非故障绕组零序电压 u_{20} 、 u_{30} 、 u_{40} , 将十二相整流发电机每三相绕组简化为单相的零序回路, 将三相整流桥简化为单相, 而故障绕组所产生的零序电压作为回路中的电压源, 得到单相接地故障下的零序回路简化模型, 如图 4 所示。图 4 中: R_n 为发电机交流侧中性点接地电阻; R_z 为发电机直流侧中性点接地电阻; R_{dc} 为整流发电机空载保护电阻; C_d 为直流电缆对地的分布电容; R_s 和 C_s 分别为不控整流桥中的缓冲电阻和缓冲电容。

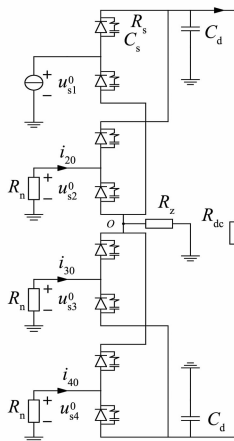


图 4 十二相整流发电机单相接地故障下的零序回路简化模型

计算中忽略量级较小的发电机分布电容、线路电阻 R 和电感 L 。第二套绕组的零序电压 u_{s2}^0 是接地电阻 R_n 和直流侧负载 R_{dc} 在故障绕组零序电压 u_{s1}^0 下分压得到, 于是有

$$u_{s2}^0 \approx \frac{u_{s1}^0 \cdot R_n}{R_{dc} + R_n} \approx \frac{-U_{a1} \cdot R_n}{R_{dc} + R_n} \quad (17)$$

可以看出, 非故障绕组零序电压 u_{s2}^0 随着接地电阻 R_n 的增大而增大, 且其幅值最终趋近于相电压。

发电机交流侧中性点接地电阻 R_n 越小, 非故障绕组的零序电压与故障绕组的零序电压相差就越大, 系统不平衡度越大, 直流电压非特征纹波也就越大。反之, R_n 越大, 4 套绕组零序电压差就越小, 系统不平衡度越小, 系统直流电压非特征纹波也就越小。因此, 从抑制非特征纹波的角度出发,

十二相整流发电机交流侧接地电阻越大越好。整流发电机交流侧不接地时, 单相接地故障下的直流电压品质最好。

4 仿真验证

采用 PSCAD 软件进行仿真。设定发电机交流侧绕组接地电阻为 50Ω 时, 系统发生交流侧单相接地故障。此时的直流电压波形如图 5 所示。由图 5 可以看出, 存在明显的非特征纹波。对直流电压 U_{dc} 进行傅里叶变换, 得到其各次纹波幅值, 如图 6 所示。由图 6 可以看出电压中出现了一定程度的偶次纹波, 且次数越低幅值越大。

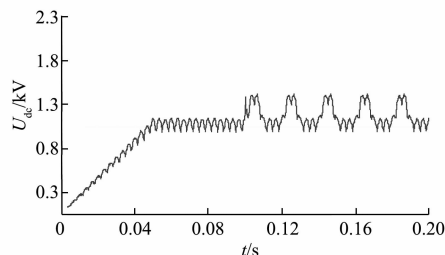


图 5 经 50Ω 电阻接地时故障下直流电压波形图

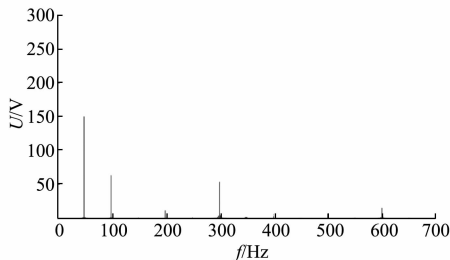


图 6 经 50Ω 电阻接地时故障下直流电压各次纹波

改变发电机交流侧中性点接地电阻的阻值进行多次仿真, 分别将其设置为 0 (直接接地)、 400Ω 和无穷大 (不接地)。分别对这三种情况下的直流电压进行傅里叶变换, 得到纹波数据, 如图 7~图 9 所示。

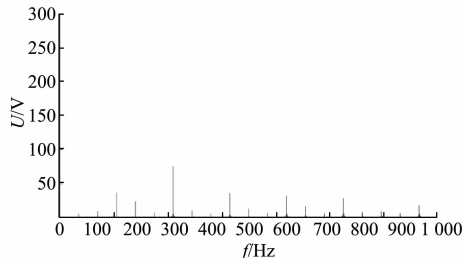


图 7 中性点直接接地情况下故障直流电压纹波

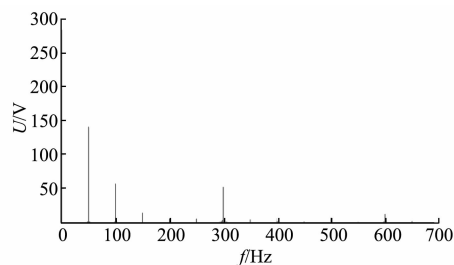


图8 中性点经 400 Ω 电阻接地情况下故障直流电压纹波

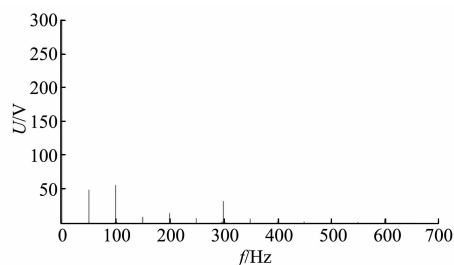


图9 中性点不接地时故障下直流电压纹波

从图7~图9所示仿真结果可以看出,随着接地电阻 R_n 越来越大,故障下直流电压的偶次纹波有所降低。其中,2次纹波和4次纹波较为明显,且接地电阻 R_n 越大,系统不平衡度越小,则非特征纹波越不明显;反之,接地电阻 R_n 越小,系统不平衡度越大,则非特征纹波越大。不接地时系统直流电压质量最高。仿真结果验证了分析的结论。

5 结 语

通过分析船舶电力系统单相接地故障下接地方式与直流纹波的关系,得出了以下结论:

(1) 十二相整流发电机正常运行时,其直流电压有 $24n$ 次的特征纹波,且纹波次数越高幅值越小。

(2) 十二相整流发电机发生交流侧单相接地故障时,直流电压中会产生偶次的非特征纹波,其中幅值较大的是2次与4次纹波,纹波次数越高幅值越小,高次纹波可以忽略。

(3) 中压直流电力系统发生单相接地故障

时,十二相整流发电机交流侧接地电阻大小与非特征纹波幅值大小反相关,即接地电阻 R_n 越小,其非故障绕组中的零序电压也就越小,非特征纹波的含量越大。

【参考文献】

- [1] 马伟明. 电力集成技术[J]. 电工技术学报, 2005, 20(1): 16.
- [2] 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.
- [3] 马伟明. 交直流电力集成技术[J]. 中国工程科学, 2002, 4(12): 53.
- [4] 张晓峰, 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.
- [5] 潘武略, 徐政, 张静. 不对称运行条件下 VSC-HVDC 动态相量建模[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1705.
- [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.
- [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.
- [8] 夏道止, 沈赞坝. 直流输电系统非特征谐波研究[J]. 西安交通大学学报, 1985, 18(2): 11.
- [9] 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.
- [10] 高倩. 电力系统谐波检测与抑制方法的研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2016.
- [11] 赵玉曼. 电力系统谐波抑制及无功补偿方法的研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2014.
- [12] HU L, YACAMINI R. Harmonic transfer through converters and HVDC links[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1992, 7(3): 514.
- [13] 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): 144.