

浮式电站黑启动方式下谐波影响因素及其表征

刘仲康¹, 王西田^{1*}, 赵正宇², 熊江跃²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 闵行区 200240;

2. 上海电气电站设备有限公司发电机厂, 上海市 闵行区 200240)

Harmonic Influencing Factors and Their Characterization Under Black Start Mode of Floating Power Station

LIU Zhongkang¹, WANG Xitian^{1*}, ZHAO Zhengyu², XIONG Jiangyue²

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai 200240, China; 2. Generator Plant, Shanghai Electric Power Generation Equipment Co., Ltd., Minhang District, Shanghai 200240, China)

摘要: 浮式电站使用静止变频器对浮式电站机组进行黑启动时, 由于运行于孤网系统且电气结构受限, 产生的谐波影响相比于陆上电站更加严重。对于浮式电站黑启动过程中产生的谐波与其影响因素之间的关系, 目前还缺少理论研究。为此, 对浮式电站黑启动过程谐波影响因素及其表征进行研究。首先, 建立了浮式电站黑启动过程的等值电路; 其次, 基于等值电路对谐波表达式进行推导分析, 得到谐波畸变率关于其影响因素的表达式, 进而提出一种谐波影响因素的表征参数——谐波作用系数, 并探讨了谐波作用系数的物理意义及应用; 最后, 通过仿真算例验证分析谐波畸变率和谐波作用系数的关系, 得到二者正相关的结论, 表明了谐波作用系数的合理性和有效性。

关键词: 浮式电站; 黑启动; 谐波影响因素; 表征参数; 谐波作用系数

ABSTRACT: When floating power stations use static frequency converters to black-start floating power station units, the harmonic effects are more serious than onshore power stations due to the isolated grid system and the limited electrical structure. There is still a lack of theoretical research on the relationship between the harmonics generated during the black start process of floating power stations and their influencing factors. Firstly, the equivalence circuits on the black-start process of floating power stations were presented. Then, the mathematical analysis of harmonics was carried out on the basis of equivalence circuits, and the expression of the total harmonic distortion on its influencing factors was

obtained. Furthermore, a characterization parameter of harmonic influencing factors, namely harmonic interfere coefficient, was proposed, and the physical meaning and application method of harmonic interfere coefficient were discussed. Finally, a simulation example was used to analyze the relationship between the total harmonic distortion and harmonic interfere coefficient. It is concluded that the harmonic interfere coefficient is positively correlated with the total harmonic distortion, which shows the rationality and effectiveness of the harmonic interfere coefficient.

KEY WORDS: floating power station; black start; harmonic influencing factors; characterization parameter; harmonic interfere coefficient

0 引言

与国内大部分地区不同, 在某些海岛及一些类似地区, 由于电网系统不完善, 用电负荷较为分散, 海上浮式电站成为这些地区兼顾经济性和用电需求的供电方式^[1]。国产首个容量达240 MW的浮式电站项目包括2台燃气轮机、1台汽轮机以及与其配套的发电机, 还有供给燃料的液化天然气(liquefied natural gas, LNG)船等。由于海上浮式电站属于孤立电力系统, 这意味着浮式电站需要进行黑启动。浮式电站黑启动时, 通过柴油发电机和静止变频器(static frequency convertor, SFC)对燃气轮机进行启动^[2]。由于SFC在变频启动过程中会产生大量的谐波^[3], 过大的谐波需配置容量更大的晶闸管, 其结果直接影响浮式电站

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(18DZ1203700)。

Project Supported by Research Program of Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (18DZ1203700).

系统参数设计。

由于百兆瓦级浮式电站是新发展的工程项目，对于其黑启动谐波的研究鲜见报道。考虑到浮式电站黑启动与陆上联合循环机组启动有相似之处，都是在启动过程中使用 SFC 将燃机升至一定转速^[4]，因此可以一定程度上借鉴陆上联合循环机组的谐波研究成果。文献[5]在 MATLAB/Simulink 平台上搭建燃机启动过程模型，仿真再现了该过程产生的大量谐波，并指出谐波危害。文献[6]分析了一台燃气轮机变频启动过程中的谐波测试数据，指出其谐波不满足标准要求，需要采取谐波抑制措施。另外，SFC 也在抽水蓄能电站中大量使用，在抽水蓄能工作过程中同样有谐波产生^[7]。文献[8]研究了抽水蓄能机组静止变频启动控制策略，并指出谐波问题一直是静止变频启动中的重要问题。针对 SFC 产生的谐波，有研究^[9]指出，加装滤波器对谐波有一定的抑制作用。文献[10]根据等值电路分析了抽水蓄能电站 SFC 的电压谐波与电流谐波之间的关系。与陆上联合循环机组及抽水蓄能机组不同的是，浮式电站机组有其自身特点，其黑启动系统短路容量小，谐波的影响更为严重。

对于浮式电站黑启动过程中产生的谐波与其影响因素之间的关系，目前还缺少理论研究。为此，本文基于等值电路，分析浮式电站机组黑启动过程中不同因素对 SFC 产生谐波的影响，在此基础上提出一种谐波影响因素的表征参数，并对其物理意义和应用方法进行分析，最后在 MATLAB/Simulink 平台上进行建模仿真验证。

1 浮式电站黑启动过程谐波分析的等值模型

电站黑启动是在没有接入电网的情况下，通过应急电源和静止变频器将发电机组启动到规定转速的过程^[11]。浮式电站黑启动过程大体流程如下：通过盘车马达使机组达到盘车转速，然后使用 SFC 提供电磁驱动力矩，克服阻力矩并实现机组的升速；当达到一定转速时，燃机点火，产生逐渐增大的机械驱动力矩，与电磁驱动力矩共同作用，将机组加速到 SFC 退出的转速，期间 SFC

提供功率不断减小，直至为零时 SFC 退出。

在这个过程中，由于静止变频器的非线性，整个黑启动系统会产生谐波，并且谐波会随不同的电气系统特性参数和状态参数变化。与陆上电网黑启动不同的是，浮式电站处于海上，由于空间和载重的限制^[12]，电力设备、黑启动系统短路容量无法与陆上电网达到相同的谐波要求，这会导致浮式电站黑启动系统谐波问题更加严重。

在变频启动过程中，晶闸管整流装置采用移相控制，会在交流侧产生谐波^[13]。谐波对于浮式电站的主要影响发生在启动电源侧。

谐波分析以傅里叶变换为基础，傅里叶变换可将平稳周期信号转换为频域信号，根据傅里叶级数，任何周期函数都可以转换为三角函数之和。对于浮式电站黑启动过程，由于转速时刻变化，与之相关的谐波幅值、频率也随之变化，不满足平稳周期信号的要求。对于该问题的处理，参照 GB/T 17626.7—2017^[14]，将傅里叶变换的时间窗口长度设置为 200 ms(10 个周波)，认为在 10 个周波内信号近似满足平稳周期的要求。

目前，电力领域常采用谐波畸变率(total harmonics distortion, THD)度量系统谐波^[15]。THD 被定义为全部谐波含量之和的均方根值与基波之比，用百分数表示，计算公式为

$$T_{\text{HD}} = \frac{\sqrt{\sum U_h^2}}{U_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中： U_1 为基波电压幅值； U_h 为 h 次谐波电压幅值。

浮式电站黑启动电路的拓扑结构图如图 1 所示，从左向右分别为电源、换流变压器、静止变频器及发电机组。

根据戴维南等值原理，按不同频率将电路等效为基波电路和谐波电路，如图 2 所示。浮式电

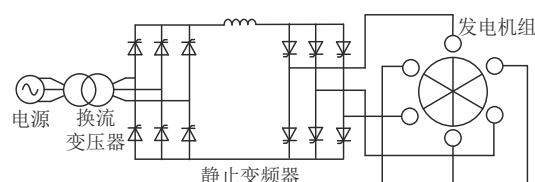


图1 浮式电站黑启动系统拓扑结构图

Fig. 1 Topological structure diagram of black start system for floating power station

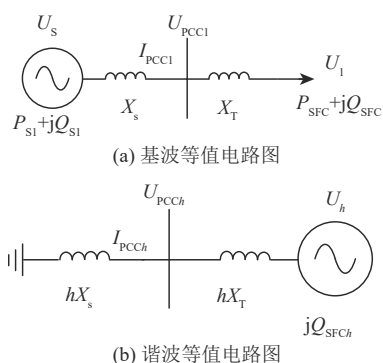


图2 浮式电站黑启动等值电路

Fig. 2 Black start equivalent circuit of floating power station

站黑启动等值电路为2个电路的叠加,其中将直流侧等值简化,主要研究交流侧谐波的影响。

在基波电路中,不考虑应急电源谐波,将应急电源用基波电路中的电压源代替,并将整流器等效为PQ负载。据此分别对系统有功、无功功率及电压列写方程:

$$\begin{cases} P_{S1} \approx P_{SFC} \\ Q_{SFC} + \frac{P_{SFC}^2 + Q_{SFC}^2}{U_1^2} (X_s + X_T) = Q_{S1} \\ \left[U_s - \frac{Q_{S1} (X_s + X_T)}{U_s} \right]^2 + \left[\frac{P_{S1} (X_s + X_T)}{U_s} \right]^2 = U_1^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{S1} 、 Q_{S1} 分别为基波电路中电源输出有功、无功功率; P_{SFC} 、 Q_{SFC} 分别为SFC输出有功功率和消耗的无功功率; U_s 为电源电压; U_1 为SFC交流侧端电压; X_s 为黑启动电源等值阻抗; X_T 为换流变压器漏抗。

在谐波等值电路中,不考虑应急电源谐波,将应急电源等效为接地阻抗,并将SFC作为谐波电源,可以得到公共连接点(point of common coupling, PCC)处谐波电压,如式(3)所示。由于谐波等值电路中频率是基波电路的倍数,电力系统中的阻抗主要是感性性质,根据感抗公式,谐波等值电路中阻抗是基波电路中阻抗的 h 倍。

$$U_{PCC_h} = \frac{X_s}{X_s + X_T} U_h \quad (3)$$

式中 U_{PCC_h} 为PCC处 h 次谐波电压。

该电路中的谐波功率 Q_{SFC_h} 可以表示为

$$Q_{SFC_h} = \frac{U_h^2}{hX_s + hX_T} \approx \frac{U_{PCC_h}^2}{hX_s} \quad (4)$$

2 黑启动方式下谐波影响因素的表征

2.1 谐波作用系数的定义

SFC的谐波与其运行状态(直流电压、直流电流、触发角、逆变角等相关。参考HVDC的稳态运行特性关系^[16],在SFC运行过程中,SFC无功功率与SFC有功功率的关系表示为

$$Q_{SFC} = P_{SFC} \tan \varphi_1 \quad (5)$$

其中,角度 φ_1 的定义如下:

$$\cos \varphi_1 \approx 0.5 [\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)] \quad (6)$$

式中: μ 为熄弧角; α 为触发角。

根据谐波电流与基波电流的关系^[17],以及谐波阻抗与基波阻抗的关系,可以得到 Q_{SFC_h} 与 Q_{SFC} 的关系,即

$$\frac{Q_{SFC_h}}{Q_{SFC}} = \left\{ \frac{\sin(\mu h/2) \sin[h(\pi/6 - \alpha/2 - \mu/2)]}{\sin(\mu/2) \sin(\pi/6 - \alpha/2 - \mu/2)} \right\}^2 \frac{1}{h} \quad (7)$$

根据式(5)、(7),得到 Q_{SFC_h} 与 P_{SFC} 的关系:

$$Q_{SFC_h} = P_{SFC} \frac{\tan \varphi_1}{h} \left\{ \frac{\sin(\mu h/2) \sin[h(\pi/6 - \alpha/2 - \mu/2)]}{\sin(\mu/2) \sin(\pi/6 - \alpha/2 - \mu/2)} \right\}^2 \quad (8)$$

浮式电站黑启动系统PCC处谐波畸变率 T_{HD0} 表达式为

$$T_{HD0} = \frac{\sqrt{\sum U_{PCC_h}^2}}{U_{PCC1}} \quad (9)$$

式中 U_{PCC1} 为基波电压。

根据式(4),式(9)可以变换为

$$T_{HD0} = \sqrt{\frac{\sum h Q_{SFC_h}}{U_s^2 / X_s}} = \sqrt{\frac{\sum h Q_{SFC_h}}{S_{sc}}} \quad (10)$$

式中 $S_{sc} = U_s^2 / X_s$, 为启动电源短路容量。

将式(8)代入式(10),可得:

$$T_{HD0} = \sqrt{\frac{P_{SFC}}{S_{sc}}} \sum f(h) \quad (11)$$

$$f(h) = \tan \varphi_1 \left\{ \frac{\sin(\mu h/2) \sin[h(\pi/6 - \alpha/2 - \mu/2)]}{\sin(\mu/2) \sin(\pi/6 - \alpha/2 - \mu/2)} \right\}^2 \quad (12)$$

从式(11)提取出与谐波次数无关的特征常量,用于反映浮式电站黑启动系统谐波影响因素,定义为谐波作用系数(harmonic interfere coefficient, HIC),以变量 H_{IC} 表示,其表达式为

$$H_{IC} = \sqrt{\frac{P_{SFC}}{S_{sc}}} \quad (13)$$

在机组启动过程中，SFC为转子升速提供电磁驱动力矩。当转子升速达到点火转速后，SFC输出功率减小直至退出。SFC输出有功功率满足如下关系：

$$P_{\text{SFC}} = (Ja + T_f - T_m)\omega \quad (14)$$

式中： J 为机组转子转动惯量； a 为角加速度； ω 为转速； T_f 为阻力矩； T_m 为燃机机械驱动力矩(点火之前为零)。

考虑到机组的实际运行，转子的角加速度先增大再减小。 P_{SFC} 随角加速度和转速乘积的增大而增大，在这个过程中，由于转速只能连续变化，故在角加速度最大时 P_{SFC} 接近最大，根据前面的分析，此时系统谐波畸变率也接近最大。

综上，HIC与SFC功率、系统短路容量有关。当黑启动系统短路容量不变时，SFC功率越大，系统最大谐波畸变率越大，HIC也越大；当SFC功率不变时，黑启动系统短路容量越大，系统最大谐波畸变率越小，HIC也越小。考虑极限情况，变频启动系统直接由无穷大电网供电，短路容量 S_{sc} 很大， H_{IC} 很小，此时变频启动装置PCC处最大谐波畸变率很小。由分析可知，HIC表征了SFC功率与系统短路容量的比值对PCC处谐波畸变率的影响程度。HIC越大，最大谐波畸变率越大，表明SFC功率与系统短路容量的比值对谐波的影响程度越大；反之，表明该比值对谐波的影响程度越小。

2.2 谐波作用系数物理意义的补充分析

2.2.1 HIC与电流谐波的关系

为分析THD与谐波因子(harmonic factor, HF)之间的关系^[10]，从等值电路的角度出发，可以得到以下表达式：

$$H_F = \frac{\sqrt{\sum (h^2 I_{\text{PCC}h}^2)}}{I_{\text{PCC1}}} \quad (15)$$

式中： H_F 为谐波因子，是一个与电流谐波关联的量； $I_{\text{PCC}h}$ 为 h 次谐波电流； I_{PCC1} 为SFC的基波电流。

$$P_{\text{SFC}} = U_{\text{PCC1}} I_{\text{PCC1}} \quad (16)$$

联立式(9)、(15)、(16)，可以得到 T_{HD0} 与 H_F 的关系：

$$T_{\text{HD0}} = \frac{P_{\text{SFC}}}{S_{\text{sc}}} H_F \quad (17)$$

将式(13)代入式(17)可以得到

$$T_{\text{HD0}} = H_{\text{IC}}^2 H_F \quad (18)$$

式(18)体现了 T_{HD} 与 H_{IC} 的关系，可见HIC和谐波计算密切相关。

2.2.2 HIC与短路比的关系

黑启动SFC系统和高压直流输电在电能变换和传递关系上有相似之处。在交直流相互作用分析中，常使用短路比(short circuit ratio, SCR)作为表征系统交直流作用强弱的指标^[18]。在浮式电站黑启动系统中，谐波问题同样可以使用类似短路比的表征参数。在这类分析中，将短路比定义为换流站交流母线的短路容量与额定直流功率的比值，在计算中使用 S_{CR} 表示短路比，即

$$S_{\text{CR}} = \frac{S_{\text{sc}}}{P_{\text{SFC}}} \quad (19)$$

HIC表征交直流互联系统中谐波影响因素的强弱，SCR表征交直流系统相互作用的程度，如稳定性、功率传输极限。从式(13)、(19)可以看出，HIC和SCR都与变频器输入功率、黑启动系统短路容量有关，二者存在一定关系，即

$$S_{\text{CR}} = \frac{1}{H_{\text{IC}}^2} \quad (20)$$

2.3 谐波作用系数的应用

HIC可以用来筛选燃机黑启动的可行方案，同时对已有方案的调整有指导作用。在进行实际系统参数设计时，可以通过对设计系统HIC的计算分析，从谐波要求的角度筛选出系统参数设计的可行方案。

从前文分析中可以看出，HIC较小的系统所产生的谐波更容易达到相关谐波要求。根据式(13)可知，通过减小变频器功率、增大黑启动系统短路容量均可以减小HIC。在实际应用中，利用HIC和THD的关系，可以得到所需的系统参数。在谐波适用标准确定的情况下，可以快速计算出SFC额定功率和系统短路容量的可行值，从而进行系统参数设计。

同样地，在系统设备已经选定的情况下，通过设备参数能够得到该系统的HIC，利用THD和HIC的关系可以得到THD。在谐波适用标准确定

的情况下，对黑启动方案的谐波水平是否满足相关谐波标准进行评估。

3 算例仿真分析

3.1 浮式电站黑启动模型搭建

以某 240 MW 浮式电站黑启动过程为对象进行建模仿真，对 PCC 处电压、电流进行谐波分

析，探讨黑启动过程中最大谐波畸变率随短路容量和 SFC 功率的变化规律，从而验证 HIC 的合理性和有效性。

在 MATLAB/Simulink 仿真平台上建立浮式电站黑启动仿真模型，如图 3 所示，包括电源、换流变压器，6/6 脉冲式 SFC 的整流器、逆变器，同步电机及其励磁系统。

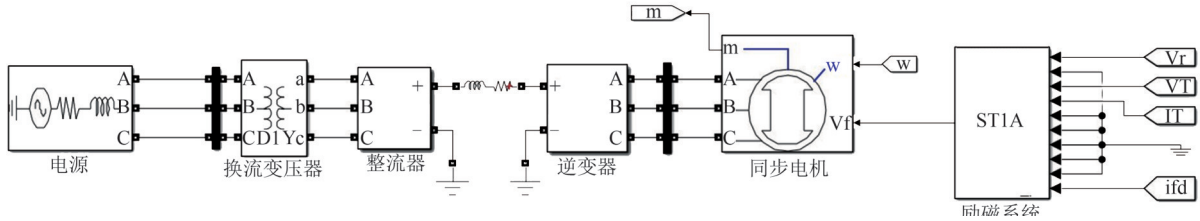


图3 浮式电站黑启动仿真模型
Fig. 3 Black start simulation model of floating power station

仿真模型参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真模型参数设置

Tab. 1 Simulation model parameter setting

参数	数值
PCC 处额定电压/kV	6.3
换流变压器漏抗/pu	0.18
盘车转速/(r·min ⁻¹)	300
点火转速/(r·min ⁻¹)	600
SFC 退出转速/(r·min ⁻¹)	2 100
SFC 功率 P_{SFC} /MW	0~3.0
短路容量 S_{sc} /(MV·A)	15/30/60/150

3.2 SFC 功率对 THD 的影响分析

浮式电站启动 SFC 的输出功率与机组转动惯量、升速曲线有关。SFC 输出功率越小，提供的加速力矩越小，角加速度越小，达到 SFC 退出转速(2 100 r/min)的启动时间越长。在其他参数不变的情况下，分别设置 3 种升速曲线，对应启动时间分别是 135、155、175 s，仿真得到黑启动 SFC 输出功率变化曲线，如图 4 所示。可以看出，每种启动过程中 SFC 输出功率先增大后减小，且功率最大不是出现在转速最大时，而是出现在角加速度最大(即加速力矩最大)附近。

通过计算，此时 PCC 处电压谐波畸变率随启动时间变化曲线如图 5 所示。对比图 4、5 可知，THD 和 SFC 输出功率呈现相同的变化趋势，且最大 THD 和最大 SFC 输出功率基本同时出现。

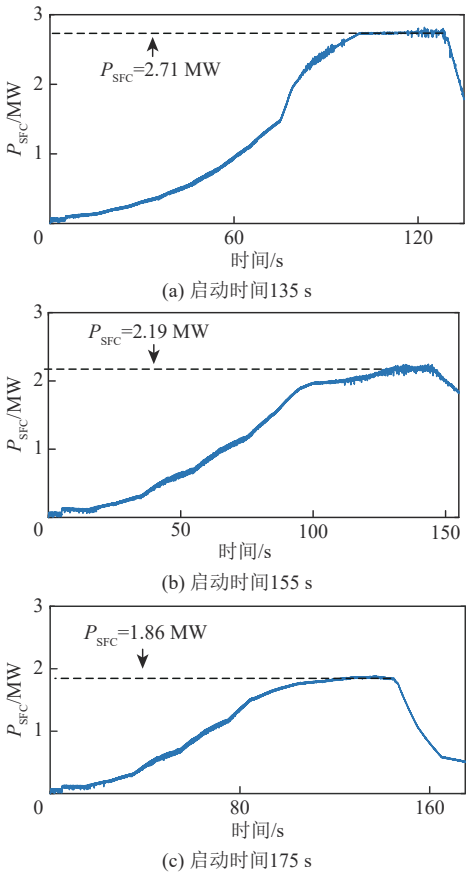


图4 黑启动过程SFC输出功率曲线
Fig. 4 Output power curves of SFC during black start

为了更加直观地得到最大 THD 及对应功率 P_{SFC} 的关系，将 3 种启动时间的最大 THD 及对应功率 P_{SFC} 绘制于图 6，可以看到，启动过程中最大 THD 与 P_{SFC} 存在正相关关系。

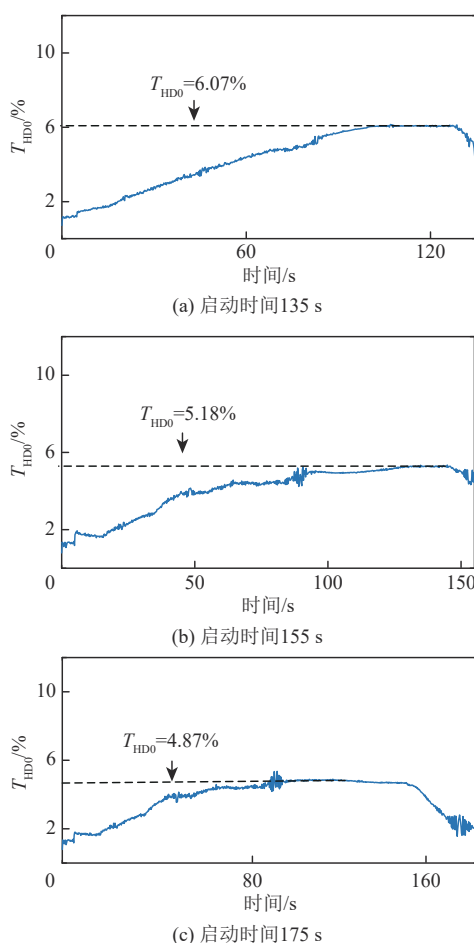
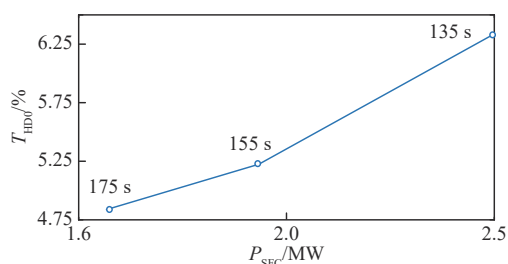


图5 黑启动过程THD曲线

Fig. 5 THD curves during black start

图6 不同 P_{SFC} 对最大THD的影响Fig. 6 Impact of different P_{SFC} on maximum THD

3.3 短路容量对THD的影响分析

在其他参数不变的情况下, 分别设置短路容量 S_{sc} 的数值为15、30、60、150 MV·A, 将 $S_{sc}^{-1/2}$ 与最大THD的变化关系绘制成图7。

从图7可以看出, 最大THD与 $S_{sc}^{-1/2}$ 约呈正相关关系, 如: 当短路容量 S_{sc} 为15 MV·A时, 最大THD为22.21%; 当短路容量 S_{sc} 为30 MV·A, 最大THD变为12.38%。由此可见, 图7中数据与HIC表达式(13)吻合。

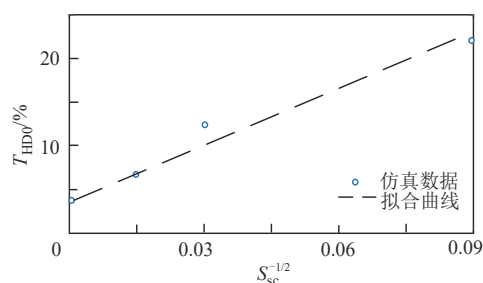


图7 短路容量和THD的变化关系

Fig. 7 Relationship between short circuit capacity and THD

3.4 THD与HIC的关系

根据算例仿真结果, 记录几组不同短路容量 S_{sc} 和不同SFC功率 P_{SFC} 下的数值, 根据式(13)计算得到HIC, 将其与最大THD绘制成图8。可以看出, 在浮式电站黑启动过程中, 最大THD与HIC近似呈线性关系, 且最大THD随着HIC增大而增大, 表明HIC的定义具有合理性。

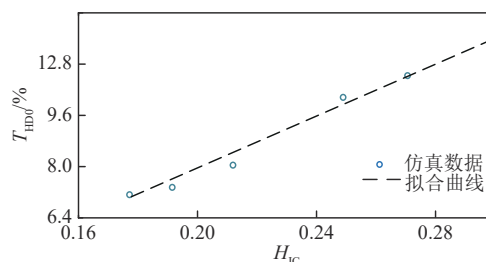


图8 HIC与THD的变化关系

Fig. 8 Relationship between HIC and THD

对于短路容量 S_{sc} 为60 MV·A的黑启动电源, 通过6组数据的计算, 拟合得到其自身THD-HIC曲线。为满足启动过程中谐波畸变率不超过8%的要求, 在上述启动设置中, HIC临界值大约为0.24。通过式(13)进行计算, 为满足谐波标准要求, SFC输出功率不能超过3.46 MW。

4 结论

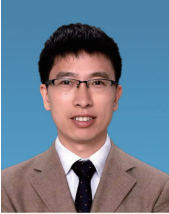
1) 浮式电站黑启动系统PCC处的谐波与SFC输出有功功率、启动电源短路容量密切相关, HIC能够定量表征SFC输出有功功率、启动电源短路容量对谐波的影响, HIC与THD之间存在正比例关系。

2) HIC计算简便, 便于指导浮式电站黑启动方案的设计与评估。在方案设计阶段, 根据关系

曲线,由谐波允许值插值得到SFC输出功率的最大允许值,并由此确定SFC设备的额定功率;在方案评估阶段,针对某个浮式电站黑启动方案,可以由其系统参数计算得到HIC,根据HIC与THD的关系曲线估算出THD,并由此评估该黑启动方案可行性。

参考文献

- [1] 张文昊. 浮式LNG发电船设计关键技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
ZHANG W H. Research on key technologies of floating LNG power generation ship[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [2] 李旭, 罗嘉, 丁勇, 等. 辅助重型燃气轮机黑启动的大容量储能系统控制技术及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 1069-1081.
LI X, LUO J, DING Y, et al. Control technology and application of large-scale energy storage system assisting black start of heavy duty gas turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 1069-1081.
- [3] 刘鹏凯. 抽水蓄能机组变频启动暂态过程监测方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
LIU P K. Study on transient process monitoring method of frequency conversion starting in pumped storage power unit[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [4] 葛进. 国产静止变频器在燃机系统中的应用[J]. 电工技术, 2020(16): 1-2.
GE J. Application of domestic static frequency converter in gas turbine system[J]. Electric Engineering, 2020(16): 1-2.
- [5] 舒杨. SFC装置在燃机启动过程中的Simulink可视化仿真[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
SHU Y. The simulink visualization simulation of SFC device in the process of combustion engine start[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [6] 胡可嘉, 张军, 张天宇, 等. 基于Matlab/Simulink仿真的H级燃机发电机静态变频启动装置谐波分析[J]. 发电技术, 2020, 41(6): 697-705.
HU K J, ZHANG J, ZHANG T Y, et al. Harmonic analysis of H class gas turbine generator starting with static frequency converter based on Matlab/Simulink simulation[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(6): 697-705.
- [7] 袁波, 张健, 张顺仁, 等. 抽水蓄能SFC拖动过程电能质量测试方案设计及应用[J]. 水电能源科学, 2021, 39(2): 183-185.
YUAN B, ZHANG J, ZHANG S R, et al. Power grid fault diagnosis method based on DHNN fingerprint database[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(2): 183-185.
- [8] 李博文. 基于Speedgoat的抽水蓄能机组静止变频启动控制策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
LI B W. Research on the control strategy of static frequency conversion starting of pumped storage unit based on Speedgoat[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [9] 秦荣, 李子龙, 王熙. 抽水蓄能电站网侧谐波分析与消除[J]. 水电与抽水蓄能, 2019, 5(5): 78-82.
TAI R, LI Z L, WANG X. Analysis and elimination of harmonics in power grid of pumped storage power station[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2019, 5(5): 78-82.
- [10] 李基成. 现代同步发电机励磁系统设计及应用[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2009.
LI J C. Design and application of excitation system of modern synchronous generator[M]. 3rd Edition. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [11] 陈海华, 李新成, 胡旦华, 等. 具有黑启动功能的液化天然气一体化厂用电方案[J]. 现代电力, 2020, 37(5): 456-462.
CHEN H H, LI X C, HU D H, et al. An liquefied natural gas-integrative auxiliary power scheme with black start function[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(5): 456-462.
- [12] IEEE. IEEE guide for the design and application of power electronics in electrical power systems on ships: IEEE Std 1662-2008[S]. USA: IEEE, 2009.
- [13] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
WANG Z A, LIU J J. Power electronics technology [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2009.
- [14] 全国电磁兼容标准化技术委员会. 电磁兼容 试验和测量技术 供电系统及所连设备谐波、间谐波的测量和测量仪器导则: GB/T 17626.7—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
National Electromagnetic Compatibility Standardization Technical Committee. Test and measurement technology power supply system and connected equipment harmonic and inter-harmonic measurement and measuring instruments guide: GB/T 17626.7—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [15] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量 公用电网谐波: GB/T 14549—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.

- National Technical Committee for Standardization of Voltage and Current Levels and Frequency. Quality of electric energy supply Harmonic in public supply network: GB/T 14549—1993 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1993.
- [16] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- LI X Y. HVDC transmission system[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [17] 陶大军, 戈宝军, 林鹏, 等. 发电电动机静止变频器起动低频运行阶段的谐波特性[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6450-6457.
- TAO D J, GE B J, LIN P, et al. Harmonics characteristics of generator/motor starting with static frequency converter during low frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6450-6457.
- [18] 辛焕海, 章枫, 于洋, 等. 多馈入直流系统广义短路比: 定义与理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 633-647.
- XIN H H, ZHANG F, YU Y, et al. Generalized short-circuit ratio of multi-infeed DC system: definition and theoretical analysis[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2016, 36(3): 633-647.
-
- 收稿日期: 2022-04-22。
- 作者简介:
- 
- 刘仲康
- 刘仲康(1996), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统建模、仿真与控制, 1980125700@qq.com;
- 
- 王西田
- 王西田(1973), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统机网协调、动力系统建模仿真、分布式能源系统, 本文通信作者, x.t.wang@sjtu.edu.cn。
- (责任编辑 尚彩娟)