

# 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

胡可嘉<sup>1</sup>, 张军<sup>1</sup>, 张天宇<sup>2</sup>, 高立新<sup>3</sup>

(1. 上海闵行燃气发电有限公司, 上海市 闵行区 200245; 2. 土耳其 EMBA 公司, 上海市 黄浦区 200010; 3. 上海电力大学环境与化学工程学院, 上海市 杨浦区 200090)

## Harmonic Analysis of H Class Gas Turbine Generator Starting With Static Frequency Converter Based on Matlab/Simulink Simulation

HU Kejia<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>, ZHANG Tianyu<sup>2</sup>, GAO Lixin<sup>3</sup>

(1. Shanghai Minhang Gas Power Generation Co., Ltd., Minhang District, Shanghai 200245, China; 2. EMBA Electricity Production Co. Inc., Huangpu District, Shanghai 200010, China; 3. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China)

**摘要:** 随着燃气-蒸汽联合循环发电技术不断发展, 发电机容量和参数要求不断提升。H 级燃气-蒸汽联合循环发电机的发电机需具备更为稳定、高效、安全的启动要求。为此, 静态变频装置(static frequency converter, SFC) 启动技术发展也迎来新的挑战。SFC 启动技术精准、灵活、高效控制的同时, 产生的谐波分量会对电源系统的电能质量有一定的影响。通过 Matlab/Simulink 建立 H 级燃机发电机 SFC 启动仿真模型, 模拟发电机启动过程, 观察系统参数变化, 分析谐波分量占比。仿真结果显示, 采用 SFC 启动可通过调节输出电流的频率和幅值, 柔性提升发电机的转速, 发电机启动受冲击小。但 SFC 内置大量非线性电气元件, 会使大量谐波分量涌入系统之中, 影响电能质量。因此, 提出 2 种抑制谐波影响的 SFC 接入优化方案, 即增设输入电抗器方案和输入电源改接发电机机端方案。通过仿真模型证实了 2 种方案都可有效抑制或减少谐波影响, 满足电能质量要求。

**关键词:** 燃气-蒸汽联合循环发电; 静态变频装置(SFC); 变频调速; 重型燃机发电机; 谐波分析

**ABSTRACT:** With the development of gas-steam combined cycle power generation technology, the requirements of generator capacity and parameters are constantly improving. The generators of H class gas-steam combined cycle generator

unit need to have more stable, efficient and safe starting requirements. It also stimulates improvement of static frequency converter (SFC) technology facing more challenge. SFC technology has displayed its advantages in controlling accurately, flexibly and efficiently. Meanwhile, SFC brings more harmonic components to influence the quality of power system. SFC start-up simulation model of H class gas turbine generator was built by Matlab/Simulink to simulate the generator start-up process, the evolvement of various parameters was researched and the proportion of harmonic components during the generator starting was analyzed. The simulation results show that the SFC start-up can increase the speed of the generator flexibly by adjusting the frequency and amplitude of the output current, and the impact of the generator start-up is small. However, large numbers of nonlinear electrical components built in SFC will cause higher proportion of harmonic components appear in power system and influence power quality. Therefore, two optimization schemes for SFC access were proposed to suppress harmonic effects, which are the scheme of adding input reactor before SFC and the scheme of changing generator end of input power supply. Through the simulation, it was proved that the two schemes can effectively suppress or reduce the harmonic effect and meet the requirements of power quality.

**KEY WORDS:** gas-steam combined cycle power generation; static frequency converter (SFC); variable frequency speed regulation; heavy duty gas turbine generator; harmonic analysis

基金项目: 国家自然科学基金项目(51571140)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51571140).

## 0 引言

燃气-蒸汽联合循环发电是传统火力发电领域高效清洁发电技术, 而 H 级重型燃机的研发、生产和装备能力是国家在重工业发展水平的重要标志之一。H 级重型燃机不仅有利于传统高效清洁发电行业, 而且对于我国航天、船舶、分布式能源等领域的发展意义重大。近年来, 我国在 H 级重型燃机的引进、研发、国产化的进程中, 始终保持对科研力量和资金投入的大力投入<sup>[1]</sup>。

随着 H 级重型燃机的不断发展, 与之配套的发电机及其电气设备的研发和装备也成为重点研究领域。由于燃机装机容量不断增大, 配套发电机及其电气设备的生产工艺、制造材料、参数设定、运行方式等具有更为苛刻的设计要求, 甚至使常规技术已无法满足, 需进一步研究和突破, 寻找新的解决方案。

重型燃机发电机多采用静态变频装置(static frequency converter, SFC)启动。SFC 通过 PI 控制调节发电机定子输入电流的频率和幅值, 柔性提升发电机转速, 具有调速精准、灵活、高效等特点, 发电机启动时受冲击影响小。但 SFC 内置大量二极管、IGBT、电感、电容等非线性电气元件, 大量谐波分量涌入系统中, 影响电能质量<sup>[2-3]</sup>。

谐波分量和谐波畸变率影响系统设备的正常运行, 降低电能使用效率。系统设备受谐波影响而产生过热、振动、噪声等现象, 加速设备老化, 严重时会使设备发生故障或烧毁。系统的表计、继电保护和自动装置也会受谐波影响而发生计量错误、保护误动等<sup>[3-6]</sup>。

本文主要通过 Matlab/Simulink 构建 H 级燃机发电机 SFC 启动模型进行仿真, 观察和分析启动过程各系统参数变化情况。并在仿真结果基础上, 对系统供电电源的电流和电压波形进行 FFT 分析, 研究 SFC 启动时产生的谐波影响, 提出减少谐波影响的优化方案, 满足电能质量要求。

## 1 H 级燃机发电机 SFC 启动 Matlab/Simulink 建模

按常规设计, SFC 接至 6 kV 厂用电系统<sup>[7]</sup>,

接线原理如图 1 所示。模型中设定 6 kV 母线额定电流为 2 kA, 开关柜额定电流为 1.25 kA, 额定热稳定电流为 40 kA, 持续时间不小于 3 s, 额定动稳定电流为 100 kA, 系统短路容量不超过 200 MV·A。中性点经中阻接地, 功率因数为 0.9。

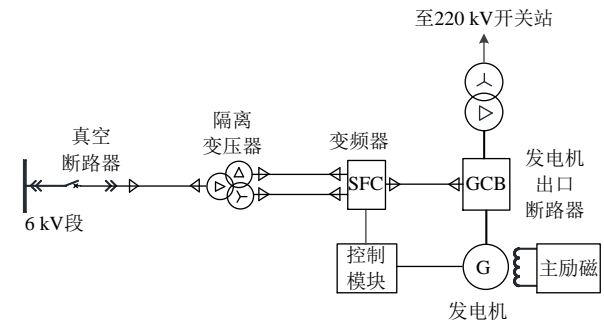


图 1 SFC 接线原理图

Fig. 1 SFC wiring schematic diagram

SFC 设定如下: 采用 12-6 脉冲方式, 最大轴功率为 9.2 MW, 最小短路容量为 250 MV·A, 隔离变 DDy01 接线, 输入变压器阻抗为 11%, 输出变压器阻抗为 8%, 隔离变压器空载额定电压为  $2 \times 2168$  V, 输出额定电流为 1.595 kA<sup>[8]</sup>。SFC 的 IGBT 逆变器门脉冲受控制模块调节。

发电机设定为 H 级燃机同步发电机, 其额定容量为 588.2 MV·A, 额定电压为 20 kV, 额定电流为 16.981 kA, 额定功率因数为 0.85, 频率为 50 Hz, 额定转速为 3 000 r/min, 转化为角速度 314.15 rad/s, 效率为 98.99%, 极数为 2 极, 相数为 3 相, 直轴次暂态电抗饱和值  $X_d''$  为 23.3%。扭矩为额定容量与角速度的比值, 计算得到扭矩为 1.87 MN·m。

H 级燃机发电机 SFC 启动 Matlab/Simulink 模型如图 2 所示。同步发电机通过 SFC 启动的过程中, 励磁电流输入可为 0 A, 电流加入定子绕组, 通过启动绕组的作用产生启动转矩, 使电动机能自启动, 该启动方式近似于异步电机启动<sup>[9]</sup>。IGBT 逆变器输出的交流电流和频率通过 PI 控制模块采集电机的角速度和定子电流后经矢量计算所得。基本控制原理为: PI 控制模块采集电机的实际角速度  $\omega_m$ , 经计算得出交轴电流  $I_q$ , 反映电机的转矩; PI 控制模块采集电机的实际定子电流  $I_{sta}$ 、 $I_{stb}$ 、 $I_{stc}$ , 经计算得出直轴电流  $I_d$ , 反映

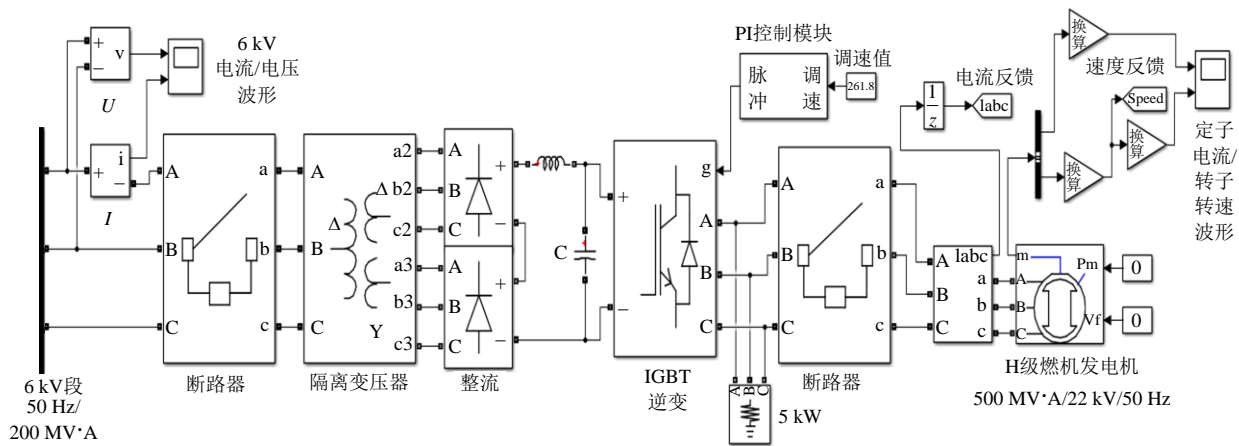


图 2 发电机 SFC 启动 Matlab/Simulink 模型

Fig. 2 Matlab/Simulink model of generator starting with SFC

电机的磁通量；PI 控制模块通过对  $I_q$ 、 $I_d$  和目标角速度  $W_{fnl}$  的计算得出定子电流调整值  $I'_{sta}$ 、 $I'_{stb}$ 、 $I'_{stc}$ ，与实际定子电流  $I_{sta}$ 、 $I_{stb}$ 、 $I_{stc}$  进行比较后，形成控制 IGBT 逆变器的门脉冲。IGBT 逆变器接收门脉冲，进而调整逆变器输出频率和电流幅值，控制电机的稳步启动<sup>[7,9-10]</sup>。为了贴近实际且便于仿真，本模型设定发电机达到联合蒸汽循环启动的转速  $N_t$  为 2 500 r/min，对应的角速度  $W_m$  为 261.8 rad/s，理想状态下启动。

H 级燃机发电机 SFC 启动转速变化曲线如图 3 所示，对应的定子电流变化曲线如图 4 所示。从图 3、4 可以看出，在发电机升速过程中，转速  $N$  与定子电流  $I_{st}$  成反比，与定子电流频率  $f_{st}$  成正比

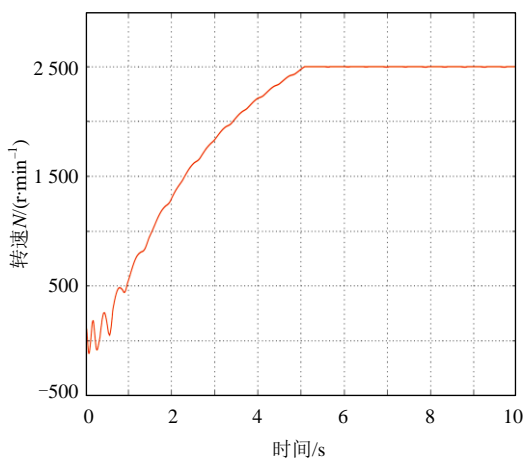


图 3 发电机 SFC 启动转速变化曲线

Fig. 3 Rotor speed curve during generator starting with SFC

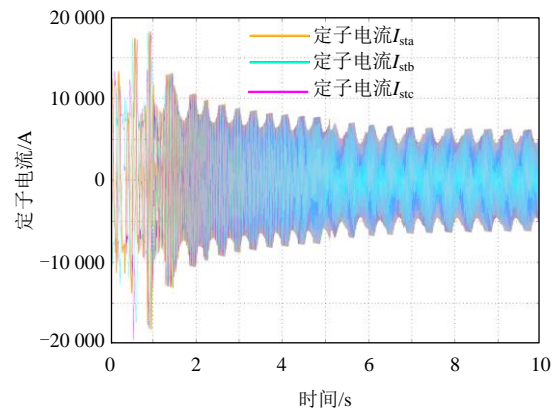


图 4 发电机 SFC 启动定子电流变化曲线

Fig. 4 Stator current curve of generator starting with SFC

比；随着转速  $N$  增大，电流  $I_{st}$  缓慢减小，频率  $f_{st}$  逐渐趋向于系统频率，满足转速公式  $N=60f_{st}/P$ ，其中  $P$  为极对数<sup>[9]</sup>。

## 2 电源侧谐波分析

### 2.1 电能质量谐波分量要求

根据国家标准 GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》的规定要求<sup>[11]</sup>，考虑谐波电流允许值和谐波电压总畸变率限值，分别见表 1、2。

不同短路容量相对于基准短路容量的谐波电流修正公式如下：

$$I_h = \frac{S_{k1}}{S_{k2}} I_{hp} \quad (1)$$

式中： $I_h$  为实际最小短路容量下第  $h$  次谐波允许修正值； $S_{k1}$  为实际最小短路容量； $S_{k2}$  为基准短路容量； $I_{hp}$  为基准容量下第  $h$  次谐波允许值。

表 1 谐波电流允许值

Tab. 1 Allowed harmonic values of current

短路容量	谐波次数					
	2	3	4	5	6	7
国标 6 kV 基准短路容量 100 MV·A	43	34	21	34	14	24
本模型 6 kV 最小短路容量 200 MV·A 修正值	86	68	42	68	28	48
国标 110 kV 基准短路容量 750 MV·A(220 kV 最小短路容量 2 000 MV·A 同等参照)	12.0	9.6	6.0	9.6	4.0	6.8

表 2 谐波电压总畸变率限值

Tab. 2 Threshold of total distortion rate of harmonic voltage

电网标称电压/kV	电压总谐波畸变率/%
6	4
110(220 kV 同等参照)	2

## 2.2 Matlab/Simulink FFT 谐波分量分析

利用 Simulink 模型中的 Powergui FFT Analysis 分析 6 kV 电源在发电机启动过程中的各高次谐波分量情况<sup>[11]</sup>。

6 kV 单相电流、相间电压变化总曲线和  $t_1=(0.20,0.30)$  s、 $t_2=(3.00,3.10)$  s、 $t_3=(9.00,9.10)$  s 3 个时间段内的变化曲线分别如图 5、6 所示。可以看出,发电机变频启动升速过程中,对 SFC 的 6 kV 供电电源具有一定的电流冲击影响,待升速完成后 6 kV 电源电流趋于正常的稳定值。

对 SFC 的 6 kV 供电电源的单相电流的各高次谐波进行分析。6 kV 电源频率  $f=50$  Hz 固定不变,分别选取 3 个时间段的电流波形进行谐波分析,选取波形的时间区间分别为  $t_1=(0.20,0.30)$  s、 $t_2=(3.00,3.10)$  s、 $t_3=(9.00,9.10)$  s,即对转速启动阶段电流波形、转速中期爬升阶段电流波形、转速稳定阶段下 6 kV 电流波形进行分析,结果如图 7 所示。

由图 7(a)可得,  $t_1=(0.20,0.30)$  s 时间段电流波形的有效电流  $I_1=5309$  A。该时间段电流波形各高次谐波值见表 3。

图 7(b)可得,  $t_2=(3.00,3.10)$  s 时间段电流波形的有效电流  $I_2=2979$  A。该时间段电流波形各高次谐波值见表 4。

由图 7(c)可得,  $t_3=(9.00,9.10)$  s 时间段电流波

形的有效电流  $I_3=947.8$  A。该时间段电流波形各高次谐波值见表 5。

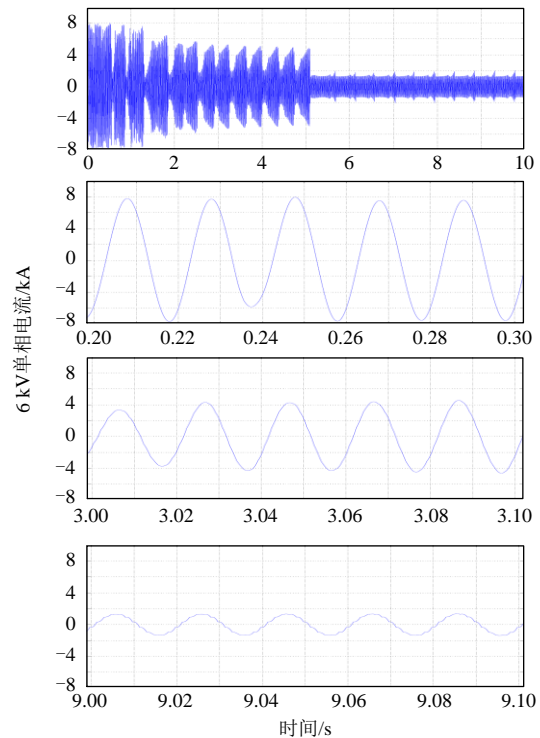


图 5 6 kV 单相电流变化曲线

Fig. 5 6 kV phase current curve

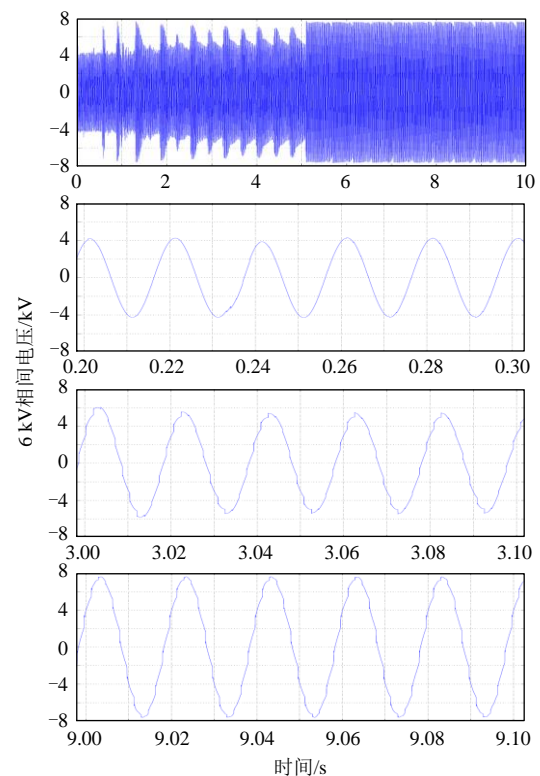
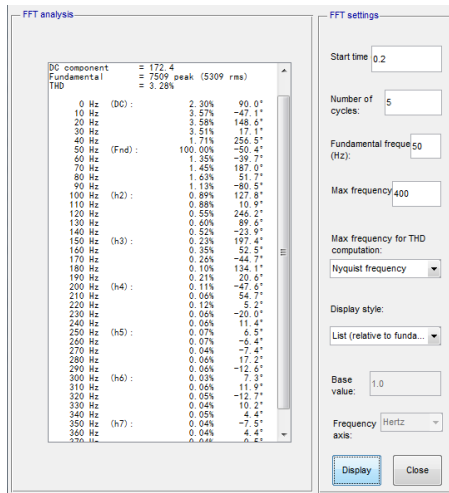
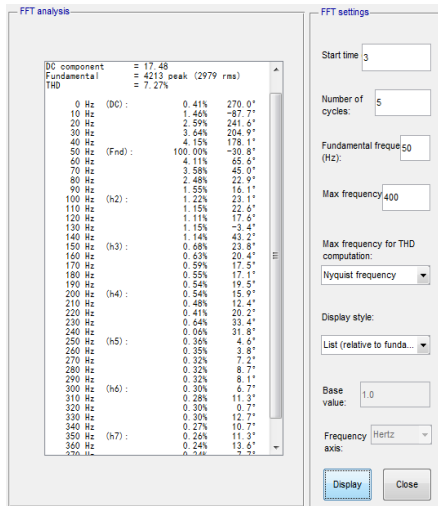


图 6 6 kV 相间电压变化曲线

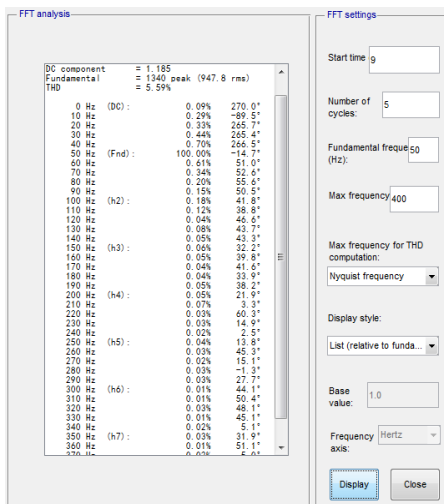
Fig. 6 6 kV phase to phase voltage curve



(a)  $t_1=(0.20,0.30)$  s



(b)  $t_2=(3.00,3.10)$  s



(c)  $t_3=(9.00,9.10)$  s

图7 3个时间段的电流波形FFT分析

Fig. 7 FFT analysis of current waveforms in three time periods

表3  $t_1=(0.20,0.30)$  s 电流波形各高次谐波值  
Tab. 3 Higher harmonic values of current waveform at  $t_1=(0.20,0.30)$  s

谐波	占比率/%	有效电流/A
基波	100	5309
2次谐波	0.89	47.25
3次谐波	0.23	12.21
4次谐波	0.11	5.84
5次谐波	0.07	3.72
6次谐波	0.03	1.59
7次谐波	0.04	2.12

表4  $t_2=(3.00,3.10)$  s 电流波形各高次谐波值  
Tab. 4 Higher harmonic values of current waveform at  $t_2=(3.00,3.10)$  s

谐波	占比率/%	有效电流/A
基波	100	2979
2次谐波	1.22	36.34
3次谐波	0.68	20.26
4次谐波	0.54	16.09
5次谐波	0.36	10.72
6次谐波	0.30	8.94
7次谐波	0.26	7.75

表5  $t_3=(9.00,9.10)$  s 电流波形各高次谐波值  
Tab. 5 Higher harmonic values of current waveform at  $t_3=(9.00,9.10)$  s

谐波次数	占比率/%	有效电流/A
基波	100	947.8
2次谐波	0.18	1.71
3次谐波	0.06	0.57
4次谐波	0.05	0.47
5次谐波	0.04	0.38
6次谐波	0.01	0.09
7次谐波	0.03	0.28

此外,对  $t_1=(0.20,0.30)$  s、 $t_2=(3.00,3.10)$  s、 $t_3=(9.00,9.10)$  s 时间段的 6 kV 单相电压波形进行 FFT 分析,得到谐波电压总畸变率  $THD_{u1}$ 、 $THD_{u2}$ 、 $THD_{u3}$  分别为 5.08%、5.21%、4.40%。

通过分析可得,根据 Simulink 模型所设定 H 级燃机发电机、SFC 启动装置和 6 kV 系统参数,当发电机 SFC 启动时,6 kV 系统的电流谐波分量满足国家标准,但电压畸变率略高于国家标准。

### 3 2种SFC接入优化方案

谐波的产生是由本系统中阻抗、变频器、电机等非线性的负载所产生的非正弦电流、电压波

形引起的<sup>[12]</sup>。虽然 SFC 仅在发电机启动过程中使用, 运行时间短, 在发电机完成升速后可立刻退出 SFC, 谐波分量的影响也是短暂的, 对长期连续发电的主力电厂影响不大, 但燃机电厂多为调峰电厂, 若一年中频繁启动次数较多, 久而久之会影响 6kV 系统寿命。因此, 针对本文所建模型, 提出以下 2 个优化方案, 降低谐波带来的影响。

### 3.1 SFC 增设输入电抗器

采用加装输入电抗器的优化方案降低谐波影响, 其基本原理为: 电感在交流环境下感抗大, 而在直流环境下感抗接近于零, SFC 的 6kV 输入端加装电抗器, 可利用电感线圈在交流变化环境下产生的反电动势来抑制 SFC 启动时对 6kV 侧电流的冲击影响<sup>[13-14]</sup>。

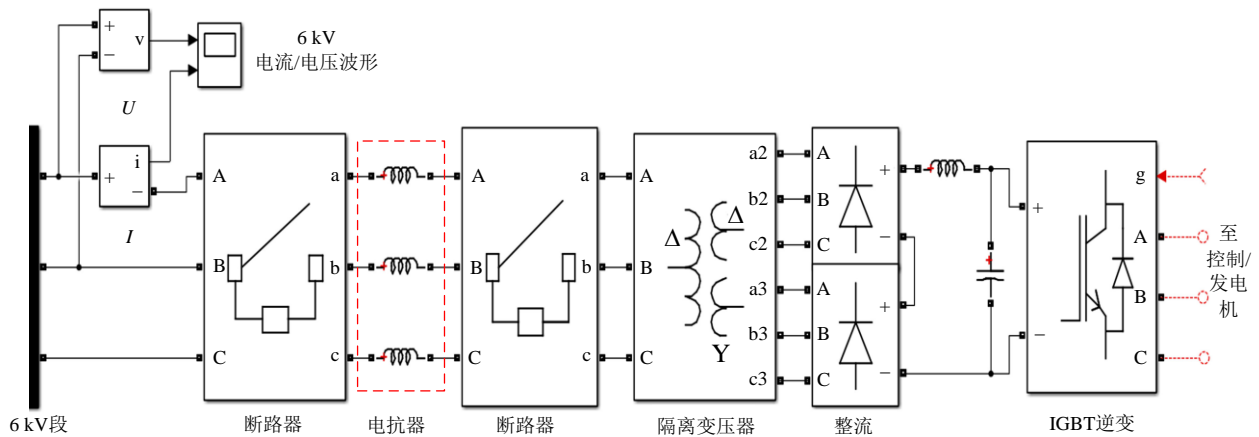


图 8 SFC 增设电抗器模型

Fig. 8 Model of adding reactor to SFC

以  $t_1=(0.20,0.30)$ s 电流波形进行 FFT 谐波分析为例, 分析结果如图 9 所示, 可得  $t_1=(0.20,0.30)$ s 电流波形的有效电流  $I_{IL}=2\ 207$  A。该时间段电流波形各高次谐波值见表 6。

对比分析表 6 与表 3, 在  $t_1=(0.20,0.30)$ s 期间, 即发电机转速启动阶段, 安装有输入电抗器下的 6kV 单相电流  $I_{IL}=2\ 207$  A, 小于未安装输入电抗器下的 6kV 单相电流  $I_1=5\ 309$  A。由此可见, 增设输入电抗器可以有效地减小发电机 SFC 启动过程中对 6kV 电源系统的电流冲击。

对于电流波形的各高次谐波, 安装有输入电抗器的各谐波占比率均小于未安装输入电抗器的各谐波占比率。由此可见, 增设输入电抗器可以有效地抑制发电机 SFC 启动过程中 6kV 系统中

电感相关公式如下:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (2)$$

$$U_L = jX_L I_L \quad (3)$$

式中:  $X_L$  为感抗;  $L$  为电感;  $\omega$  为发电机运转的角速度;  $f$  为高次谐波频率;  $U_L$ 、 $I_L$  分别为电抗器压降、电流。

由式(2)、(3)可知,  $f$  越大, 电抗器的  $X_L$  越大, 对电流中高次谐波的抑制作用也越大。而在工频状态下, 电抗器仅有一定的压降<sup>[13]</sup>。因此, 电抗器具备有效抑制 6kV 电源中高次谐波的作用。

利用已建 Matlab/Simulink 模型进行仿真。在 6kV 电源与 SFC 进线断路器之间增设电抗器, 设定其参数电感  $L_{AC}=3.2$  mH, 额定电压为 6kV。模型部分改接如图 8 所示。

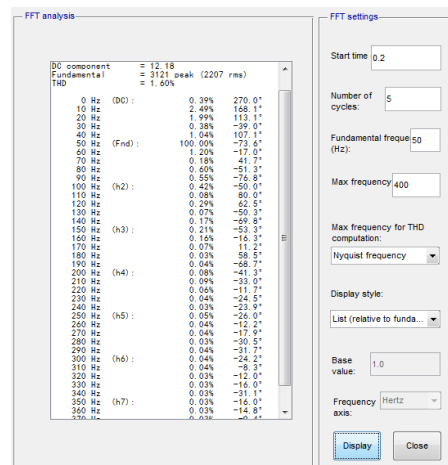


图 9 SFC 增设电抗器后  $t_1=(0.20,0.30)$ s 电流波形 FFT 分析

Fig. 9 FFT analysis of current waveform at  $t_1=(0.20,0.30)$ s after adding reactor to SFC

表 6 增设电抗器下  $t_1=(0.20,0.30)$  s 电流波形各高次谐波值

Tab. 6 Higher harmonic value of current waveform at  $t_1=(0.20,0.30)$  s after adding reactor

谐波	占比率/%	有效电流/A
基波	100	2 207
2 次谐波	0.42	9.27
3 次谐波	0.21	4.63
4 次谐波	0.08	1.77
5 次谐波	0.05	1.10
6 次谐波	0.04	0.88
7 次谐波	0.03	0.66

的高次谐波分量。

此外,对该时段内的 6kV 相间电压波形进行 FFT 分析,可得安装输入电抗器下的 6kV 谐波电压总畸变率  $THD_{uIL}$  为 0.59%, 低于未安装输入电抗器下 6kV 谐波电压总畸变率 5.08%, 且满足国家标准要求。

综上所述, SFC 在 6kV 电源输入端增设输入电抗器, 可有效抑制电流波形中的高次谐波, 减少启动过程中对 6kV 系统的电流冲击, 降低谐波电压总畸变率, 满足国家标准要求。但增设电抗器需占用一定的厂房空间, 对于布置紧凑的厂房可能会带来一定困难。

### 3.2 SFC 输入电源改由发电机机端供电

将 SFC 电源由 6kV 段改接至发电机机端与 220kV 主变之间, 220kV 电网电源通过主变降压

至 20kV 机端电源提供给 SFC。机端处具有较高的最小短路容量、额定电压和额定电流值, 承受谐波分量影响能力强<sup>[15]</sup>。

利用所建模型进行仿真, 将原 6kV 电源改为 220kV 电源, 经主变与 SFC 相连, 调整 SFC 隔离变压器额定电压和变比等参数, 模拟机端环境。主变设定为额定容量 610MV·A, 以额定容量为基准时的百分阻抗 18%, 变比  $(242 \pm 2 \times 2.5\%)$  kV/20kV (模型中变比取 220kV/20kV), 接线方式 YNd11。模型部分改接如图 10 所示。测量 SFC 启动过程中对 220kV 系统的谐波影响。

以  $t_1=(0.20,0.30)$  s 电流波形进行 FFT 谐波分析为例, 分析结果如图 11 所示。从图 11 可得, 在  $t_1=(0.20,0.30)$  s 时间段, 主变 220kV 侧电流波形的有效电流  $I_{IT1}=212.2$  A。该时间段电流波形各高次谐波值见表 7。

通过分析表 7 可知, SFC 改接至发电机机端与 220kV 主变之间后, 主变 220kV 侧电流波形的有效电流  $I_{IT1}=212.2$  A, 换算至 20kV 侧电流波形的有效电流  $I_{IT2}=2\ 334.2$  A, 电流低于同周期内接入 6kV 电源下的值, 因此该优化方案可减小对 SFC 供电电源的电流冲击。经主变后 220kV 侧电流波形各高次谐波的占比率虽然略高于 6kV 情况下的值, 但仍满足国家标准的要求。

此外, 对该时段内的 220kV 相间电压波形进

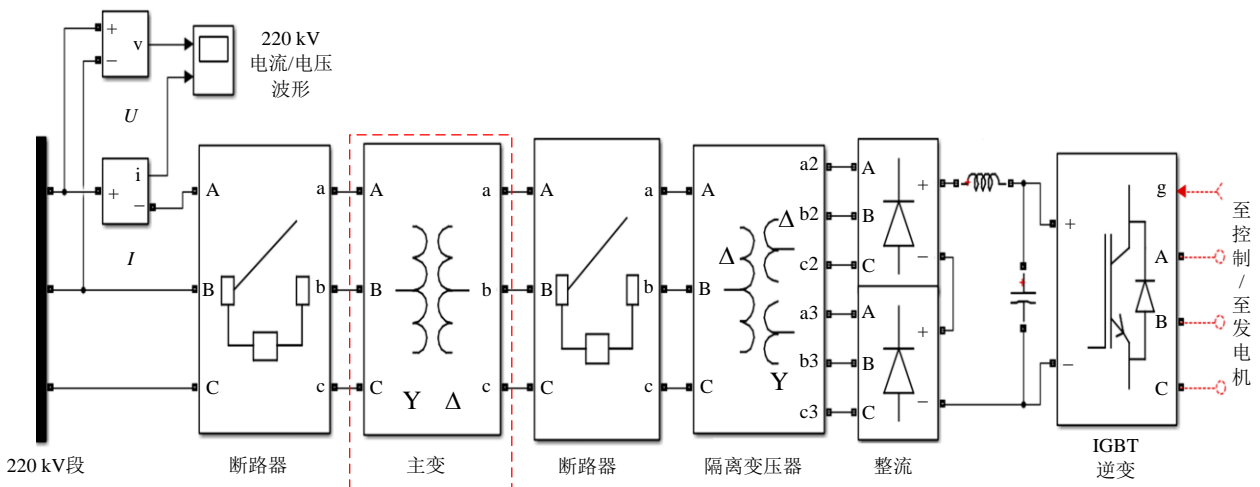


图 10 SFC 接至发电机机端与 220kV 主变之间模型

Fig. 10 Model of SFC connecting between generator terminal and 220kV main transformer

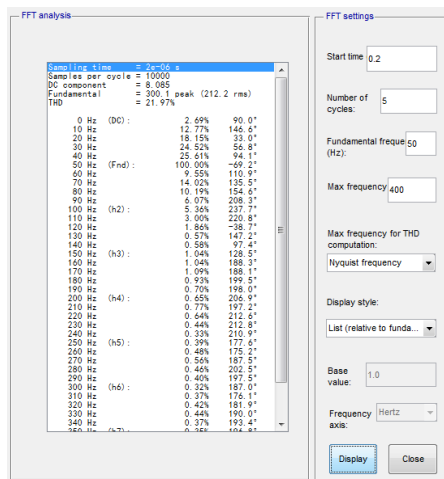


图 11 SFC 接至发电机机端与 220 kV 主变之间时  $t_1=(0.20,0.30)$  s 电流波形 FFT 分析

Fig. 11 FFT analysis of current waveform at  $t_1=(0.20,0.30)$  s when SFC connecting between generator terminal and 220 kV main transformer

表 7 SFC 接至发电机机端与 220 kV 主变之间时  $t_1=(0.20,0.30)$  s 电流波形各高次谐波值

Tab. 7 Higher harmonic value of current waveform at  $t_1=(0.20,0.30)$  s when SFC connecting between generator terminal and 220 kV main transformer

谐波	占比率/%	有效电流/A
基波	100	212.2
2 次谐波	5.36	11.37
3 次谐波	1.04	2.21
4 次谐波	0.65	1.38
5 次谐波	0.39	0.83
6 次谐波	0.32	0.68
7 次谐波	0.35	0.74

行 FFT 分析, 谐波电压总畸变率  $THD_{uIG}$  为 2.43%, 低于 6kV 情况下的值。

综上所述, 将 SFC 电源由 6 kV 段改接至发电机机端与 220kV 主变之间, 可有效地减小发电机启动过程中对电源侧的电流冲击, 降低电源侧谐波电压总畸变率。但考虑到部分燃机电厂需频繁启动的运行特点, 频繁波动的电流值也难免会给主变的正常运行和使用寿命带来一定影响。并且由于 SFC 接至发电机机端, 主厂房内机端侧一次设备的布置、数量、经济性会受到一定影响。

## 4 结论

1) 基于 Matlab/Simulink 仿真的 H 级燃机发

电机 SFC 启动模型, 可直观地模拟大容量发电机 SFC 启动过程。SFC 控制系统采集发电机转速和定子电流值, 通过内部 PI 控制逻辑进行运算和分析, 调节并反馈调速所需的电流和频率, 使发电机转速稳步上升, 逐渐达到目标转速。

2) H 级燃机发电机 SFC 输入电源的设计参数、抗冲击和抗干扰能力要求高, 利用仿真模型可直观地观察和分析 SFC 启动过程中电源侧电流的各高次谐波值和谐波电压总畸变率。仿真结果表明: H 级燃机发电机变频启动过程对 SFC 电源侧的电流冲击较大, 受一定谐波影响。为此, 提出了 2 种抑制谐波影响的 SFC 接入优化方案, 通过仿真模型验证可知 2 种方案均有效可行, 尤其是 SFC 增设输入电抗器的优化方案效果更佳, 既可以减小 SFC 启动过程中对电源侧的电流冲击, 又可以有效降低谐波影响。而 SFC 接至发电机机端与 220 kV 主变之间的优化方案, 可显著减小 SFC 启动过程中对电源侧的电流冲击, 降低谐波电压总畸变率, 但对电流高次谐波占比率和谐波电压总畸变率还有优化空间, 可进一步通过增设电抗器或滤波器等其他装置达到更好的效果。

3) 通过建立 Matlab/Simulink 模型, 可以对整个发电机启动过程中 6kV 电源、SFC、发电机等设备的重要参数变化过程进行直观分析, 且通过计算得到参数分量的变化情况, 有利于在 H 级燃机项目前期进行更合理有效的系统设计和设备选型。

## 参考文献

- [1] 蒋洪德, 任静, 李雪英, 等. 重型燃气轮机机现状与发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5096-5098.  
JIANG H D, REN J, LI X Y, et al. Status and development trend of the heavy duty gas turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5096-5098.
- [2] 曹亮. SFC 谐波滤波器的设计及应用[J]. 电工技术, 2017, 22(4): 56-57.  
CAO L. Design and application of SFC harmonic filter[J]. Electric Engineering, 2017, 22(4): 56-57.
- [3] 曾令华, 程亮, 张靖宗. 交流变频调速系统仿真建

- 模及谐波特性分析[J]. 发电技术, 2019, 40(3): 294-299.
- ZENG L H, CHENG L, ZHANG J Z. Simulation model of AC variable frequency speed regulation system and harmonic characteristics analysis[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(3): 294-299.
- [4] 宿清华. 抽水蓄能电站 SFC 装置谐波分析及抑制措施研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- SU Q H. Research on harmonic analysis and suppression measures of SFC device in pumped storage power station[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [5] 王炜, 谭锦文, 颀孙旭, 等. 高渗透率并网风力发电的谐波特点及其抑制研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(9): 59-66.
- WANG W, TAN J W, ZHUANG S X, et al. Study on harmonic characteristics and suppression of high-permeability grid-connected wind power generation[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(9): 59-66.
- [6] 宋波. 谐波影响下电力电容器的协调无功降损方法[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(11): 7-12.
- SONG B. A method of coordinated reactive power loss reduction for power capacitors under the influence of harmonics[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(11): 7-12.
- [7] 鲁勇勤, 况明伟, 李宇俊, 等. 燃机变频启动系统技术引进和创新开发设计[J]. 东方电气评论, 2009, 23(4): 43-48.
- LU Y Q, Kuang M W, Li Y J, et al. Technical transfer and innovative design for SFC system of gas turbine generator units[J]. Dongfang Electric Review, 2009, 23(4): 43-48.
- [8] ABB. LCI 基本原理及应用[Z]. Zurich, Switzerland: ABB, 2016.
- ABB. LCI principle and application[Z]. Zurich, Switzerland: ABB, 2016.
- [9] 李发海, 王岩. 电机与拖动基础[M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- LI F H, WANG Y. Fundamentals of electrical machines and drives[M]. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [10] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- WANG Z A, LIU J J. Power electronics[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [11] 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 Standard Voltages, Current Ratings and Frequencies. Quality of electric energy supply harmonics in public supply network: GB/T 14549—1993[S]. Beijing: Standards Press of China, 1993.
- [12] 龚静, 张巧杰. 有源电力滤波器半矢量预测控制策略研究[J]. 发电技术, 2019, 40(5): 462-468.
- GONG J, ZHANG Q J. Research on semi-vector predictive control strategy of active power filter[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(5): 462-468.
- [13] 孙锦, 方超, 曹亮. 变频器输入电抗器及直流滤波电容器的设计[J]. 应用科技, 2014, 41(2): 16-20.
- SUN J, FANG C, CAO L. Research on the design of input reactor and DC filter capacitor for frequency converter[J]. Applied Science and Technology, 2014, 41(2): 16-20.
- [14] 袁国刚, 饶柱石. 基于振动分析法的变压器非电量状态监测与诊断研究[J]. 发电技术, 2019, 40(2): 134-140.
- YUAN G G, RAO Z S. Review of non-electrical quantity monitoring and fault diagnosis for power transformer on vibration analysis method[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(2): 134-140.
- [15] 李养俊, 何子春, 张强, 等. 火力发电厂电能质量测试与评估分析[J]. 发电技术, 2018, 39(2): 135-139.
- LI Y J, HE Z C, ZHANG Q, et al. Test and evaluation of power quality in thermal power plant[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(2): 135-139.

收稿日期: 2020-01-03.

作者简介:



胡可嘉

胡可嘉(1987), 男, 硕士, 工程师, 从事燃机电厂电气专业管理工作, hukj@mh.shanghaipower.com;



高立新

高立新(1967), 女, 副教授, 主要研究方向为电力安全工程, glx2010@shiep.edu.cn.

(责任编辑 尚彩娟)