

测功机系统谐振分析及解决方案

刘清亮¹ 谢 磊² 王文滨¹ 陈 杰³

(1. 潍柴动力股份有限公司 2. 潍柴重机股份有限公司 3. 山东华天电气有限公司)

摘要：测功机是一种用于测试发动机或其他机械设备功率的设备，由于测功机系统自身特性及安装条件的差异，极易出现系统谐振，造成电压、电流波形畸变，影响设备的正常运行，造成器件损坏。本文通过对测功机系统的仿真，分析系统谐振的原因，提出用阻尼装置解决测功机系统谐振的方案，并对方案实施后的效果进行仿真验证。

关键词：测功机；四象限变频器；系统谐振；阻尼电阻；C型滤波器

0 引言

测功机是一种用于测试发动机或其他机械设备功率的设备，由于测功机系统组成部件自身特性及安装条件的差异，极易出现系统谐振，造成波形畸变，测功机滤波柜内器件损坏，影响测功机正常运行。

1 背景需求

某测功机现场，测功机滤波柜内电流过大；滤波电容器经常损坏；阻尼电阻过热、掉漆。现场情况如图1所示。

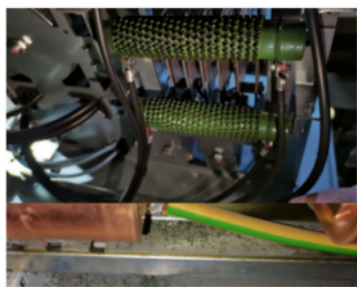


图1 阻尼电阻过热掉漆

2 现场工况

一测功机车间，系统构成如下：变压器10kV/690V，6.3MVA，短路阻抗7.45%，组别DYN11；变压器输出连接配电柜，配电柜输出通过三组电缆连接至变频柜，电缆长110m，截面1200mm²。

2.1 变频器

容量：2000kW；开关频率：电网侧2.5kHz；电机侧1.25kHz。一台变频器由两套装置并联构成：输入滤波柜×2，整流器×2，变频器×2。

2.2 整流单元

两电平变流器，交流侧输出电感（PWM电感）：165μH/1015A。

2.3 滤波单元

滤波单元由滤波电容和阻尼电阻构成，其中，滤波电容线间容量：55.7μF×3=167.1μF，折合到相电容501.3μF，三相电容功率76kvar，额定电流63A。

阻尼电阻0.023Ω，无功电流63A，电阻静态功率90W。逆变器输入电抗165μH/1015A，电抗率13.5%，开关频率2.5kHz，估计开关纹波电流10%（100A），阻尼电阻功率230W。

由于电缆阻抗的存在，单台设备的 LC 谐振频率估计在 550Hz~350Hz 之间。实际测量中系统存在 5 次、7 次电流谐波，产生谐振后会导致滤波电容或者阻尼电阻烧毁。

现场测试数据如图 2、图 3 所示。其中，相电压 400V，谐波含量为 1.6%， $U_{h17}=1V$ ；电流 800A，谐波含量为 11.9%， $I_{h17}=19A$ 。

有实际测试数据可得：

- 1) 电网侧电压畸变 13 次最高，4V；
- 2) 设备侧电压畸变 17 次最高，7V。

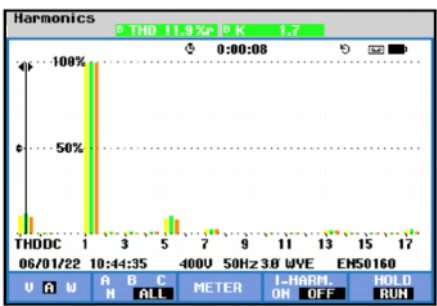


图 2 电压谐波含量

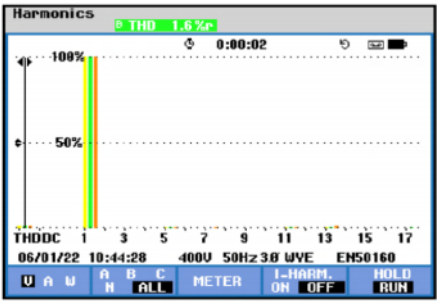


图 3 电流谐波含量

由于变频器通过 110m 电缆与变压器连接，17 次谐波电流在变频器侧谐振变大，因此，仿真验证 17 次谐振问题。

3 系统仿真

为分析系统发生谐振的原因，解决系统谐振问题，进行如下仿真、分析。

3.1 仿真电路

如图 4 所示，仿真电路图中，将供电变压器、变压器输出母排、110m 出线电缆、滤波单元、逆变器输入电抗器参数具体化。

变频器及输入电缆等效电路图如图 5 所示。

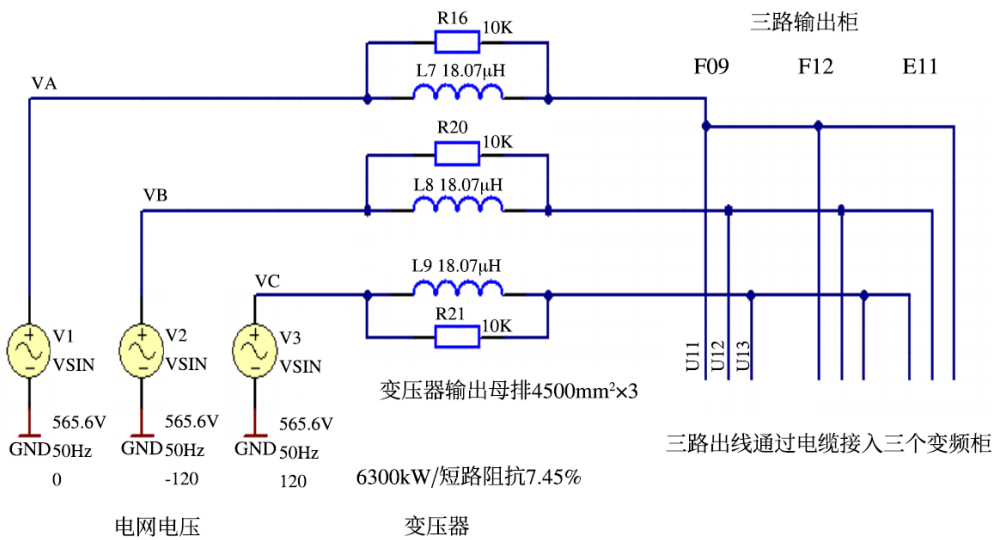


图 4 配电系统等效电路图

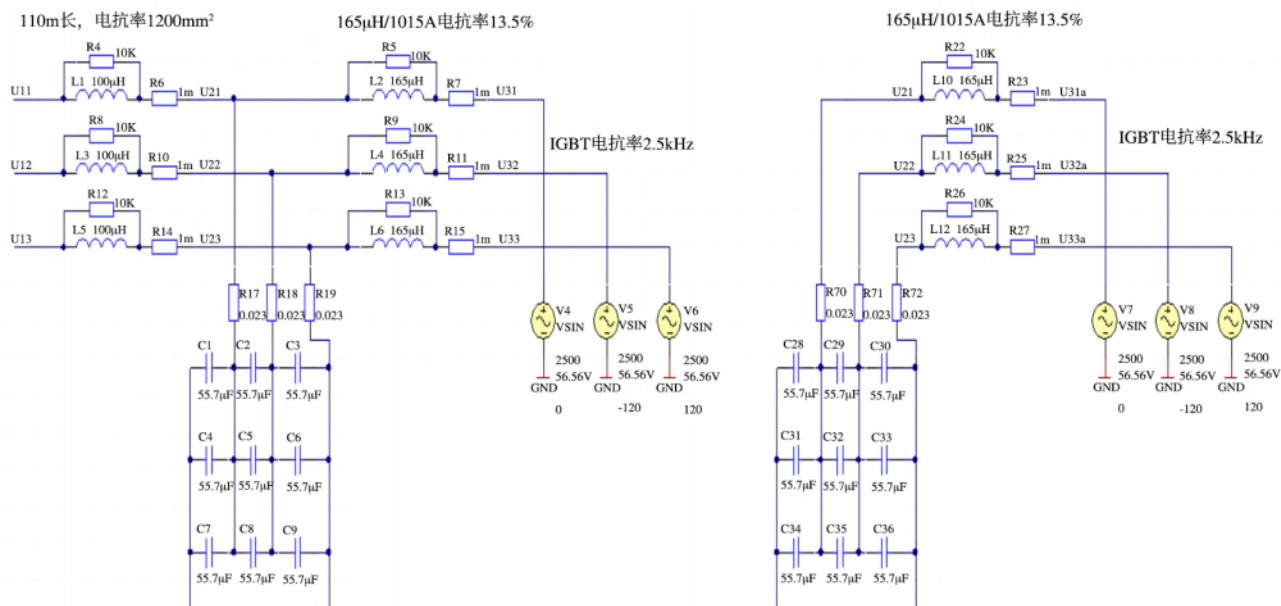


图 5 变频器及输入电缆等效电路图

3.2 电网电压作为激励源仿真

电网电压做激励源，全部变频器运行及无源网络工作。测量点具体位置见图 4、图 5。

3.2.1 时域分析

如图 6 所示，变压器配电柜出口的电压 U11~U13 容易谐振，在变频柜入口的电压，震荡更加严重。载波电容电流投入时震荡比较严重，容易烧毁缓冲接触器、载波电容。

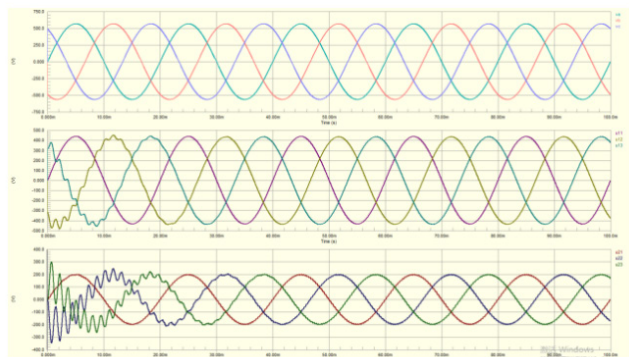


图 6 时域波形

3.2.2 小信号分析

如图 7 所示，电网电压 V1、V2、V3 电压信号，幅值 1V，相差 120°。系统谐振放大频率 680Hz，变压器配电柜出口端电压放大至 2.5V，放大 2.5 倍；变频器入口端电压放大至 6.8V，放大 6.8 倍；载波电流 14.7A。如果 3% 的电压谐波 12V，可产生 176A 的谐波电流（每台设备）。

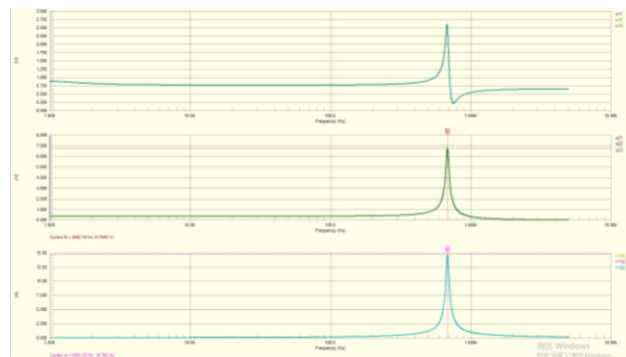


图 7 小信号仿真

3.3 变频器作为激励源仿真

3.3.1 一台变频器为激励源，一台正常工作

由仿真分析可得，当作为激励源的变频器产生 2A、468Hz 电流谐波时，正常工作的设备滤波电容谐波电流约 3A，有放大作用。由于模型的缺陷，实际谐振点可能在 350Hz，届时将会加剧载波电容器老化。

3.3.2 一台变频器为激励源，一台 IGBT 停止工作

由仿真分析可得，当作为激励源的变频器产生 2A、468Hz 电流谐波时，正常工作的设备滤波电容

谐波电流约 14A，有 7 倍的放大作用。由于模型的缺陷，如果实际谐振点在 350Hz，将会更加严重。

从实测数据看，7 次谐波可以达到 20A 多，7 次谐波放大对于载波电容损坏严重。

4 C 型滤波器抑制电网谐波电压分析

在系统中新增 C 型滤波器，用于抑制电网谐波电压。仿真图如图 8 所示。

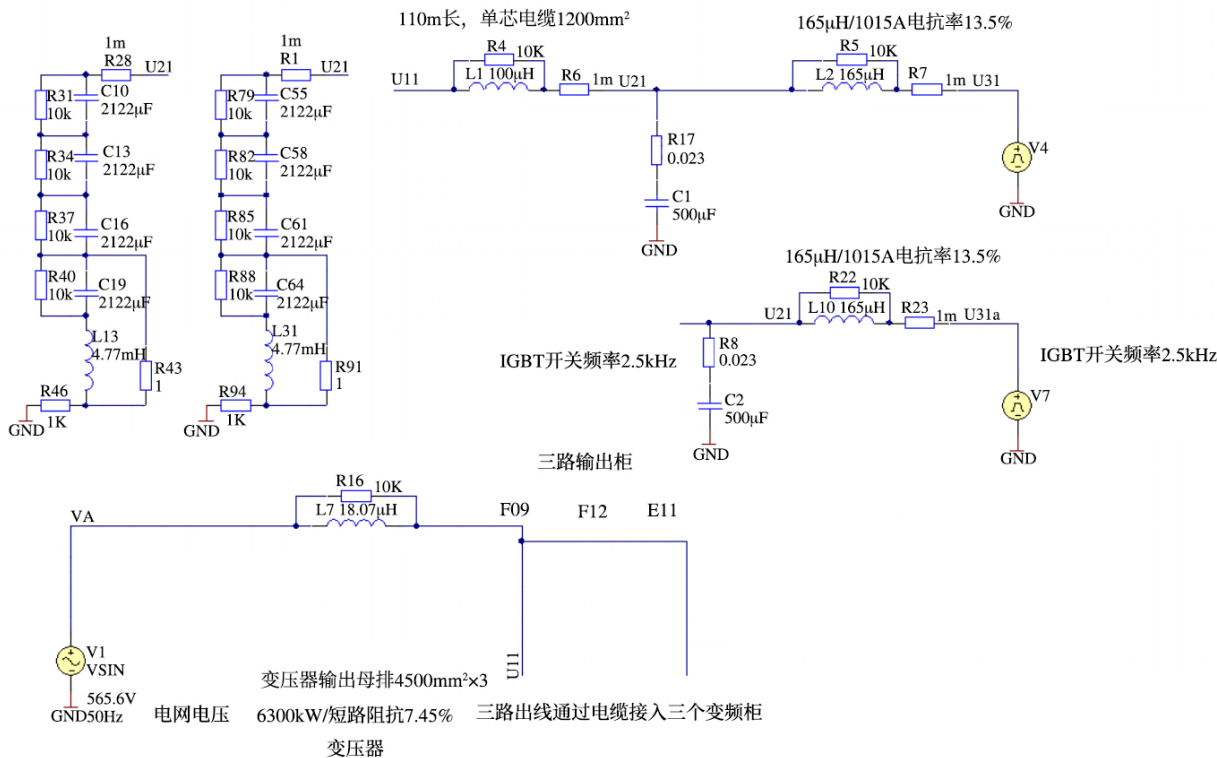


图 8 加入 C 型滤波器仿真图

图 8 中，电容器、电抗器与电阻器构成二阶 C 型滤波器回路。电网 V1 小信号激励源（1V）。

4.1 C 型滤波器关闭仿真

由仿真分析可得，原系统在电网（或者其它变频器）有谐波电压时，在 700Hz 处，谐振放大，1V->17A，3% 电压为 12V，电流谐波 200A。

4.2 一路 C 型滤波器效果仿真

由仿真分析可得，当系统增加一路 C 型滤波器时，在 700Hz 处，谐振放大，1V->3.5A，3% 电压为 12V，电流谐波由 200A 降至 42A，已经比较稳定。同时 C 型滤波器的谐振电流也很小，1V->1.6A，3% 电压为 12V，电流谐波 19A。

4.3 两路 C 型滤波器效果仿真

由仿真分析可得，当系统增加两路 C 型滤波器时，在 700Hz 处，谐振放大，1V->2A，3% 电压为 12V，电流谐波由 200A 降至 24A，非常稳定。同时 C 型滤波器的谐振电流也比较小 1V->1A。

因此，增加 1 路 C 型滤波器，可以大幅降低系统谐振点，同时降低开关纹波电流；而增加第二路 C 型滤波器后，效果不明显，因此，测功机系统中，采用 1 路 C 型滤波器用于抑制系统谐振。

5 C 型滤波器中电阻 R 的效果分析

由仿真分析可得，阻尼电阻 R 从 $(1 \sim 10) R$ 效果，C 型滤波器在谐振点电流 1.6~0.6A 递减；阻值越小，变频器滤波电容谐振点电流越小，为 3~12A。

当 R 从 $(0.1 \sim 1) R$ 效果，C 型滤波器在谐振点电流 8~1.6A 递减；阻值越小，变频器滤波电容谐振点电流越小，为 3~6A。

因此，阻尼电阻取值小于 $1R$ 对于变频器滤波电流影响很小，并且会出第二峰，但即使取值 $0.1R$ 也能正常工作。

6 仿真结论

测功机系统故障高发的原因分析：

- 1) 设备的高频滤波单元阻尼电阻功率小，阻尼能力弱，易发生谐振；
- 2) 系统阻抗高（110m 电缆），滤波电容容易过载；
- 3) 滤波电容设计裕度小，容量衰减快，容易过载损坏；
- 4) 多设备共用变压器，易发生谐振，运行设备损伤空载或待机设备。

上述最核心原因是 17 次附近的谐振，原装置的谐振点电压 3%，12V 可产生 200A 的电流谐波，此时电

阻过热掉漆，而开关、熔断器跳闸，电容器烧毁。

7 设备方案

通过仿真分析可得，每台测功机配置一台 160kW 系统谐振阻尼装置，内含 80kvar C 型高通网络，80kW 有源阻尼装置。

2 次高通网络用于抑制高次系统谐振，同时滤除 30%~50% 变频器 PWM 整流器的开关纹波，有效降低变频器原配滤波单元的纹波电流，提高系统稳定性。通过仿真谐振峰降至 1V/3A，3% 的电压谐波 12V，电流谐波 36A，效果明显。

80kW 有源阻尼装置负责高通网络的投切控制，同时抵消无源网络的容性电流。装置工作于谐振阻尼模式，与有源网络一起抑制系统谐振，系统图如图 9 所示。

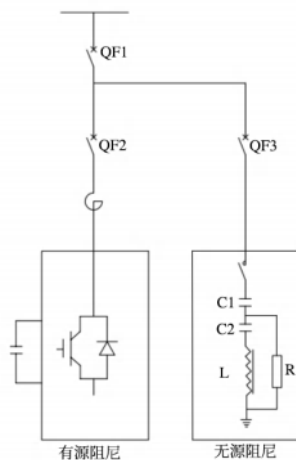


图 9 阻尼装置系统图

8 结束语

本文针对某柴油机厂测功机的应用造成系统谐振导致器件损坏问题，经过仿真，分析了系统谐振原因，提出采用阻尼装置抑制系统谐振的方案。通过现场运行测试，阻尼装置效果良好，抑制了系统谐振，提高了供电系统稳定性，在测功机系统中得到广泛应用。

（下转第 83 页）