

柴油发电机组在带 UPS 等非线性 负载时的问题及解决措施

□ 周路来 ZhouLulai

一、引言

为确保网络数据中心、数据交换中心、金融结算中心、重要系统调度中心等关键部门的设备能得到不间断的电源供电，这些部门通常采用“市电供电+柴油发电机组备用+UPS 电源”所组成的电源供电系统。UPS 作为自市电停电到备用柴油发电机组供电的中间段的电源设备可以将蓄电池的电能在无延时地逆变向重要负载供电，从而保证在柴油发电机组启动供电前负载不断电，而当柴油发电机组投入使用时，UPS 就作为机组的负载，为电池进行充电。整流滤波器件是 UPS 的主要部件之一，这种非线性负载会向柴油发电机组反射大量的高次谐波，其中以 5 次和 7 次谐波危害最严重，尤其是非线性负载较大而发电机组容量又较小时这种危害就更明显，主要表现在以下几种故障现象：

1. 发电机组的输出电压突然增高到 440V 以上，其后果是造成 UPS 损坏。
2. 发电机组输出频率到 50 ~ 60Hz，致使 UPS 保护动作。
3. 发电机组在出现频率或电压异常的同时出现严重的机械共振现象，柴油机出现有节奏的摇摆和声音起伏，严重时还出现损坏发电机的励磁回路和 AVR。
4. UPS 因检测到过电压或过频率而自动关断整流器，由后备电池组向负载放电或从旁路直接向负载供电。

二、故障出现的原因

1. 发电机组的瞬态调压特性

由于发电机组的内阻比市电电网大得多，其输出容量非常有限，当负载突变时，发电机组的电压瞬态变化很大而且所需的恢复时间较长，在 GB2820-90 中用瞬态电压

调整率（标准要求 $\pm 20\%$ ）和电压恢复时间（标准要求 $\pm 2.4\text{S}$ ）两个指标来衡量。有些用户主要只注重看发电机的稳态电压调整率（标准要求 $\pm 1\%$ ），其实后者在当今大多数发电机的指标相差不大，而前两个指标却与发电机的瞬态电抗和励磁系统的特性有较大关系。

2. 发电机的励磁特性

小容量三相同步发电机主要有以下几种励磁方式：

无刷永磁式（PMG）

无刷自励式

三次谐波励磁

相复励

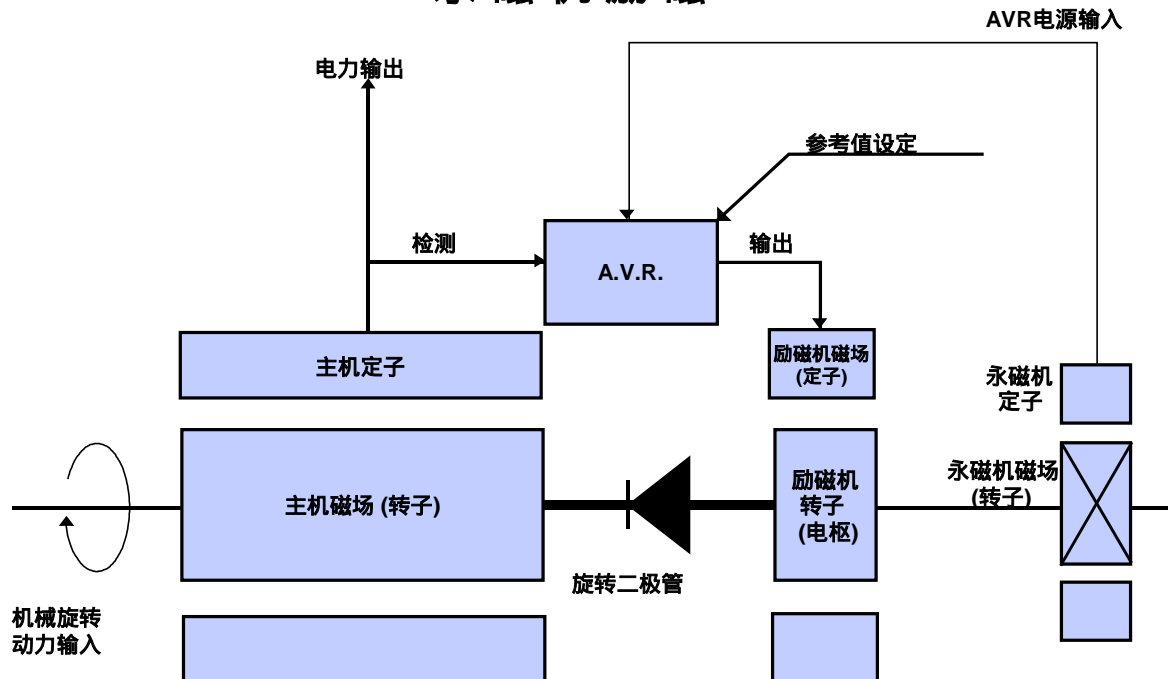
其中以无刷永磁式励磁方式性能最好。永磁励磁系统由五部分组成：发电机主励磁绕组（转子），永磁发电机（PMG），自动电压调节器（AVR），励磁机和旋转二极管。励磁系统的工作原理是：当发电机旋转时，永磁发电机（PMG）的永磁转子同轴旋转，切割 PMG 的定子绕组而产生三相正弦电势，引入发电机自动电压调节器（AVR）作为 AVR 的输入电源，AVR 通过检测发电机的三相输出电压自动调节励磁机磁场的励磁电流，从而调节励磁机转子的三相输出电压，经旋转二极管整流后输送至发电机主转子的励磁回路。由此可见，输出电压的调节，其实是通过 AVR 对励磁机磁场的调节来实现的（如附图所示）。在这个系统中有下列几个特点：

由于 PMG 系统提供一个与定子输出电压波形畸变及大小无关的恒定的励磁电源，因而能提供较高的电动机起动承受能力，并对非线性负载产生的主机定子输出电压的波形畸变具有抗干扰性，可提高发电机带非线性负载能力。

AVR 检测三相输出电压（三相方均根检测），具有精度极高的稳态电压调整率（通常可达 $\pm 0.5\%$ ）。

更强的抗无线电干扰能力。

永磁机励磁



更强的承受短路电流能力（通常可达 3 倍额定电流，持续 10S）。

3. 负载大小和性质

非线性负载占发电机额定容量的比例越大，其危害就越明显

如果非线性负载分量小，其反射到发电机的谐波污染分量小，发电机输出电压的正弦畸变率小，因而影响不明显。如果其非线性负载分量小于发电机额定容量 20%时，通常对发电机输出电压特性影响不明显。

由于不同 UPS 电源其“整流滤波器”采用不同的元器件，影响也不同

采用三相 6 脉冲整流技术的 UPS 影响大过采用三相 12 脉冲整流技术的 UPS，而采用单相整流技术的 UPS 影响更大。如果在整流元件前采用了滤波器件，则重载时影响较小，但空载或轻载时由于功率因数极低甚至接近容性则影响更大。

UPS 的投入方式的影响

当柴油发电机组启动向负载供电时，由于 UPS 已经在停电的若干秒时间内由电池组向负载放电，因此机组供电时首先接入的将是 UPS 的整流元器件，而且还有蓄电池的充电电流的大小影响。一般发电机组提供电池的充电电能相当于 UPS 容量的 20%-25% 左右。

三、故障消除措施

根据笔者所在单位的长期实践经验积累，认为最完备的解决方案是成立由用户运维人员、UPS 供应商、发电机组供应商工程技术人员组成的专家组，从各个方面综合解决问题，主要从以下几方面考虑：

1. 根据负载大小选择合适容量的 UPS 和电池组。

2. 综合各方投资尽量采用对电源设备谐波污染小的 UPS，如采用三相 12 脉冲整流技术加输入滤波器。

3. 适当加大发电机容量和选择较好带非线性负载性能的发电机。

4. 综合配电和负载特性，选择最优的负载投入方式。

由于本文的重点在于阐述柴油发电机组与 UPS 的配合问题，因而重点讲解笔者在发电机组选型方面的浅识。

1. 在选型前一定要先了解 UPS 的有关技术数据

是采用单相整流技术还是三相 6 脉冲或 12 脉冲整流技术

UPS 采用何种输入滤波方式（如 LC 滤波电路、IGBT 滤波器件）

UPS 的后备电池充电电流为多大，并计算充电容量

(4) UPS 所允许的电压畸变率和电流畸变率是多少。

2. 了解发电机采用励磁特性和瞬态特性

备用发电机采用永磁机励磁、无刷自励、三次谐波励磁还是相复励，不同励磁方式发电机所能带非线性负载的瞬态容量不同

备选发电机的瞬态电抗值

同样容量的发电机，瞬态电抗值越大带非线性负载能力越强。

3. 发电机容量与 UPS 容量的选配

由于前面介绍的各种因素影响，其选型是一个复杂的问题，需要利用 UPS 的技术数据，还需要查找发电机的相关特性资料，因而无法用一个完全公式化的方法进行计算。依据一些文献资料所记载的内容和笔者的一点经验，一般可以按照下面的比值进行选择：

发电机采用永磁他励式 (PMG) 发电机、AVR 三相电压检测并采取隔离变压器将发电机组输出电压经过隔离后再输送到 AVR。

采用 6 脉冲整流技术的 UPS $S_g=3-3.5S_u$

采用 12 脉冲整流技术的 UPS $S_g=2.5-3S_u$

采用单相整流技术的 UPS $S_g=4-5S_u$

采用高频脉宽调制技术的 UPS $S_g=2-3S_u$

S_g 表示发电机的标称功率 (kVA)， S_u 表示 UPS 的标称功率 (kVA)。

从上面的匹配数值来看，柴油发电机组的容量会比 UPS 大许多 (2 倍以上)。对于一些应用经验不多的用户、一些柴油发电机组的经销商出于商业目的或者其本身应用经验的限制，往往为 UPS 负载选配发电机组时就按照上面的功率值来简单选型。其实这里存在一个很大的误区，即认为发电机的额定容量等同发电机组的额定输出功率，并按此进行选型，结果造成用户投资浪费，且发电机组长期在轻载条件下工作还会对柴油发动机带来不利。笔者好几次均采用“小马拉大车”的方式来替用户节省投资，从上面的参考选择容量上可以看出，笔者提出的是“发电机容量”而并非整台发电机组的容量。我们知道，发电机组的输出有功功率大小取决于柴油发动机的出力，而视在功率则主要取决于发电机的容量，发电机组在带 UPS 负载时，只要加大发电机的容量，其瞬态特性就会大大的增强，而整台机组的输出有功功率其实并未增加，因而不妨采用这种所谓“小马拉大车”的方式来解决，即柴油机的功率按照所有负载有功功率之和略大来选择，发电机功率则按照上面所说的方法来配置。笔者曾经成功地用一台 32kW 的柴油机配一台 60kVA 的发电机来带动一台 6 脉冲整流技术的 15kVA UPS，其

测试的各项参数均满足技术条件要求。当然，一些柴油发电机组的经销商由于没有工厂生产的原因，也许不能按照笔者的方法来解决问题，建议尽量与生产商进行详细的技术沟通，以期更好地为用户选型。

4. 发电机组与 UPS 匹配时现场调试可能碰到的问题

既使按照上面的方法进行了选型，在现场调试的工程师还有可能碰到引言中所述的一些故障现象，笔者认为只要真正了解了 UPS 和发电机的特性，我们不能被一些表现所迷惑，有时简单调整即可解决问题。由于并非本文重点，简单说明如下：

(1) 发电机在投入 UPS 时电压、频率表摇摆不稳，这时可适当调节 AVR 的灵敏度旋钮，使其灵敏度适当降低可能会解决问题。

(2) 注意将柴油机电子调速器的外壳良好接地，对电子调速器的转速传感信号采取屏蔽措施，并将屏蔽层良好接地，避免交流干扰信号影响到调速器性能。

(3) 发电机 AVR 的电压检测有些是单相检测，有些是三相检测取平均值，最好采用三相检测的 AVR，同时为了避免发电机输出端的畸变电压又通过 AVR 反馈到励磁回路，可在 AVR 检测电压端前增加隔离变压器（有些 AVR 已采用这种方式）或并联一个适当容量的电容器。

(4) 如果发电机是无刷自励式，而上述调节方法仍不能解决问题，有些品牌的发电机可以极方便地加装 PMG（如斯坦福发电机，利莱森玛发电机，马拉松发电机等），而且投资不大，加装 PMG 后同样容量的发电机其带非线性负载能力可提高 20%左右。

(5) 有些发电机组的控制系统会出现超频保护停机，但实测机组转速正常，其实际原因可能是发电机组控制系统检测到的发电机输出电压信号含有较大的高次谐波分量造成误报警停机，可以在发电机电压信号线进入控制器前增加一个滤波电路（如 LC 电路）。